

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

(*Mention Sciences*)

PAR

A.-B. KINZEL

Ingénieur des Industries Métallurgique et Minière
de l'Université de Nancy

1^{re} THÈSE - Étude *a)* des méthodes d'essai des soudures oxyacétyléniques des tôles d'acier, et : *b)* des effets de la chaleur du soudage dans les régions de la tôle voisine de la soudure.

2^e THÈSE - Étude des méthodes de nitruration des aciers spéciaux.

Soutenues le 21 Juin 1933 devant la Commission d'examen

Président. M. TRAVERS.

Examineurs. { MM. CHEVALLIER.
LAFFITTE.
SEIGLE.

NANCY

SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES

1933

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy

POUR OBTENIR

le titre de Docteur de l'Université de Nancy

(*Mention Sciences*)

PAR

A.-B. KINZEL

Ingénieur des Industries Métallurgique et Minière

de l'Université de Nancy

1^{re} THÈSE - Étude a) des méthodes d'essai des soudures oxyacétyléniques des tôles d'acier, et : b) des effets de la chaleur du soudage dans les régions de la tôle voisine de la soudure.

2^e THÈSE - Étude des méthodes de nitruration des aciers spéciaux.

Soutenues le 21 Juin 1933 devant la Commission d'examen

Président. M. TRAVERS.

Examineurs. { MM. CHEVALLIER.
 LAFFITTE.
 SEIGLE.

NANCY

SOCIÉTÉ D'IMPRESSIONS TYPOGRAPHIQUES

1933

Université de Nancy - Faculté des Sciences

Doyen: M. LEAU

Assesseur: M. GAIN

Doyen honoraire : M. PETIT

Professeurs honoraires: MM. CARTAN, BLAISE, THOULET, MULLER, GUYOT, GUNTZ, GRIGNARD, DARMOIS E., GUTTON.

Maîtres de conférences honoraires: MM. FÉRÉE
DELATOUR

Chargé de cours honoraire : M. MILLOT

Professeurs:

MM. CUÉNOT.....	Zoologie.
MAUDUIT	Electrotechnique.
GAIN	Botanique.
HUSSON.....	Mécanique rationnelle.
TRAVERS.....	Chimie industrielle.
VAVON.....	Chimie organique.
BOURION.....	Chimie physique et Electrochimie.
LEAU.....	Calcul différentiel et intégral.
DARMOIS.....	Analyse supérieure.
FALLOT.....	Géologie.
CORNUBERT.....	Chimie.
LONGCHAMBON...	Minéralogie.
COURTOT.....	Chimie appliquée à la teinture.
CROZE.....	Physique.
MENTRÉ.....	Mécanique appliquée.
BOIN.....	Zoologie appliquée.
DE MALLEMANN.	Physique.
JOLY.....	Géologie de Lorraine.
CHEVALLIER.....	Physique.

Maîtres de Conférences:

MM. RAYBAUD	Botanique.
DELSARTE.....	Mathématiques appliquées.
POIROT.....	Physique.

Chargé de cours:

M. LAFFITTE..... Chimie générale.

Maître de conférences adjoint:

M. FRIEDEL..... Botanique.

Secrétaire: M. BERTRAND



DÉDICACE

Ce travail est dédié à tous les travailleurs qui se sont appliqués à ce sujet, notamment à Edmond Fouché, l'inventeur français du chalumeau, et Samuel Miller, ingénieur américain. J'adresse en même temps mes vifs remerciements à M. le Directeur Paul Petit et à M. Seigle, professeur à l'Ecole Supérieure de la Métallurgie et de l'Industrie des Mines de Nancy, pour le bienveillant accueil qu'ils m'ont toujours réservé et leurs excellents conseils.



Étude des méthodes d'essai des soudures oxyacétyléniques des tôles d'acier et étude des effets de la chaleur du soudage dans les régions de la tôle voisines de la soudure

Comparé à l'art ancien de la fabrication de l'acier la soudure de l'acier est vraiment une chose tout-à-fait nouvelle. Toutefois, l'application commerciale de la soudure est maintenant assez remarquable pour qu'il n'y ait pas besoin d'insister sur l'importance économique de ce procédé et ses avantages pour l'ingénieur. Il est bien significatif que le développement des procédés de soudure soit le résultat des améliorations de la qualité des soudages produits. Cette amélioration a été incessante et en même temps on a développé une technique spéciale pour étudier et éprouver les soudages. En effet, on peut même dire que l'amélioration de la qualité des soudures a été fortement influencée par le perfectionnement des méthodes d'essai qu'on leur a appliquées. Quand le soudage eut d'abord reçu l'attention sérieuse de l'ingénieur constructeur, on a appliqué les essais employés pour l'acier laminé aux joints soudés et au métal déposé dans le soudage. Mais on a bientôt constaté que ces essais ne s'appliquent pas bien aux joints, à cause de la nature hétérogène de ceux-ci. En outre, quant à certaines propriétés mécaniques importantes, comme la ductilité et les caractéristiques mécaniques du métal voisin de la soudure, on n'en tirait pas d'informations par les essais normaux employés pour l'acier laminé.

C'est pourquoi l'auteur de ce travail fit des études approfondies des méthodes d'essai pour l'application particulière à l'épreuve des soudures, et il fit également des recherches sur les propriétés des différentes zones du métal soudé adjointes à la soudure pour établir leurs caractéristiques mécaniques en vue de répondre aux besoins des ingénieurs constructeurs.

Il y a encore un autre problème qui se présente : la plupart des

soudures modernes sont faites à la main et la valeur de la soudure est influencée par l'habileté et l'expérience du soudeur. Ainsi on peut savoir que les soudures-échantillons faites suivant un procédé donné, avec des matériaux convenables, ont les propriétés mécaniques désirées pour l'application; mais si le produit final lui-même est soumis aux épreuves, peut-on être bien sûr qu'une soudure faite à une pièce donnée est absolument sans défauts mécaniques lorsqu'elle a les mêmes caractéristiques physico-mécaniques que la soudure des échantillons qu'on a éprouvés? Evidemment, quand on considère l'acier laminé le cas est différent, bien que même dans ce cas le problème d'échantillonnage soit assez sérieux. Pour arriver à une solution de ce problème il a fallu développer une série d'épreuves de nature non-destructive des objets essayés, c'est-à-dire qu'il faut que ces épreuves soient applicables aux soudures dans les pièces finies elles-mêmes. Et, en plus, il faut que l'application de l'essai à la soudure ne modifie pas sensiblement les propriétés mécaniques de la soudure ou du joint soudé. Ce problème a été étudié également par l'auteur, et il expose les moyens qu'il utilisés lui-même, ainsi que ceux qui ont été essayés par d'autres expérimentateurs, pour les discuter et les comparer.

On peut voir de suite que les essais en question se divisent en trois catégories générales: 1^o) essais destructifs, parce qu'ils mettent les matériaux sur lesquels ils sont faits, hors d'état de servir; par conséquent, ces essais ne pourront être faits que sur des échantillons; 2^o) épreuves non-destructives comme déjà dit; 3^o) essais relatifs à l'effet de la chaleur de soudage sur le métal voisin de la soudure. Tandis que les derniers essais sont vraiment de caractère destructif parce que la soudure est détruite, ils sont différents des essais de la première catégorie parce que le problème d'échantillonnage intervient peu; en effet, une fois qu'on a fait ces études, pour une soudure faite avec des méthodes et des matériaux donnés, les conditions de soudage sont en général assez analogues pour rendre possible l'application des résultats, avec une grande probabilité d'exactitude, à n'importe quelle soudure faite avec les mêmes matériaux et méthodes.

Il faudrait faire un travail analogue sur les soudures produites

par l'arc au carbone, l'électrode nue, l'électrode garnie, l'électrode enrobée et l'arc à l'hydrogène atomique. Les méthodes d'essai décrites ici s'appliqueront à chacun de ces cas. Mais étant donné le grand travail que nécessiteraient ces études, l'auteur s'est borné à n'étudier que la soudure oxyacétylénique pour le présent; et ceux qui s'intéressent aux autres procédés de soudure pourront bien appliquer les méthodes ici décrites.

LES ESSAIS DESTRUCTIFS

L'essai de traction ordinaire qu'on applique à l'acier laminé, a été la première des épreuves destructives appliquées aux soudures. C'est aussi probablement le plus important de tous les essais destructifs employés pour elles dans la pratique. Mais ces essais ne donnent pas d'information suffisante pour servir de base de jugement à un ingénieur dans les applications des soudures. Quand on fait l'essai de traction, on prépare des échantillons de section normale connue. On obtient alors la courbe tension-allongement, ou bien les nombres relatifs à cette courbe. Les résultats obtenus de cette façon ont un caractère fondamental et absolu et cela est vrai également quand on applique l'essai aux échantillons usinés du métal proprement dit de la soudure. Mais dans la préparation effective de ces échantillons, on trouve beaucoup de difficultés et bien des facteurs peuvent affecter sérieusement le métal d'une soudure donnée. Par exemple une largeur de soudure très ordinaire est celle de « $3/8$ V » (9,96 mm.). De la considération géométrique de ce « V » il est évident qu'il est impossible d'obtenir un échantillon rond d'un diamètre de l'ordre du centimètre (voir figure 1). Ainsi on est réduit à deux alternatives, à savoir : Premièrement, faire une soudure plus grande. En faisant cela, on peut bien dire — et c'est vrai pour la plupart des cas sans doute — que les propriétés du métal déposé dans une soudure de $3/8$ in. (9,96 mm.) seront différentes de celles du même métal déposé dans une soudure de $3/4$ in. V (19,92 mm.); ainsi ce procédé n'est pas rigoureusement logique.

La seconde alternative est d'employer un échantillon de section bien moins forte que le centimètre. Mais le résultat s'applique seulement à une petite proportion de la soudure, et il est bien

plus difficile d'obtenir des valeurs précises sur ces échantillons. En effet, dans la soudure il y a une grande différence entre le métal du fond et celui de la surface et en se servant d'une petite portion du métal pour faire un barreau d'essai, il est probable que la section de ce barreau ne sera pas représentative. Il y a encore des objections au cas d'échantillons de métal déposé et usiné avec tension appliquée au barreau d'essai dans une direc-

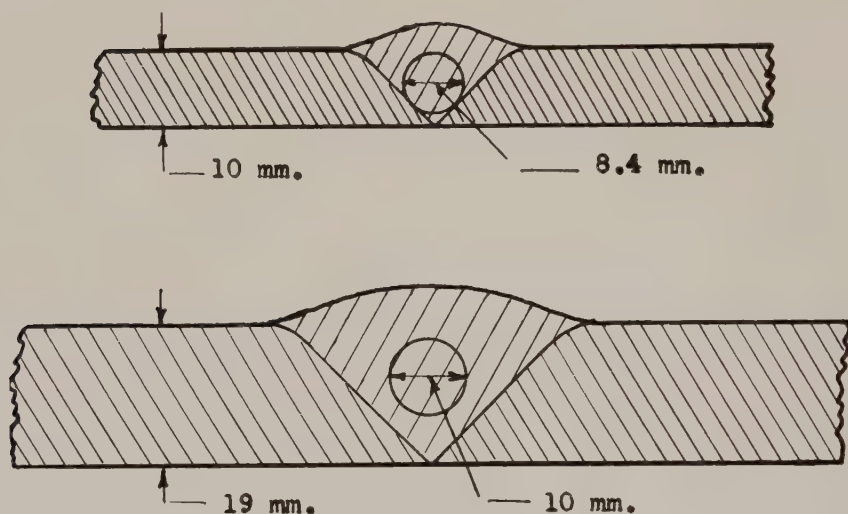


Fig. 1

Méthodes de prise de barreau dans le sens de la longueur de la soudure

tion parallèle à la longueur de la soudure et non pas à angle droit à la ligne de la soudure; en effet, en service, les efforts se présentent en général dans le sens du travers de la ligne de soudure. Ainsi il y a cette difficulté que les propriétés du métal de la soudure ne sont pas parfaitement isotropiques. Malgré toutes ces objections, il y a néanmoins beaucoup d'informations intéressantes à retirer de cet essai. Comme il est assez analogue aux épreuves ordinaires, il n'est pas nécessaire de s'étendre beaucoup à ce sujet.

L'essai de traction du joint lui-même est la première question qui se pose; il est usuel de prendre des sections faisant un angle

droit avec la ligne de la soudure. Les éprouvettes peuvent être longues ou courtes par rapport à l'épaisseur de la soudure, et on peut usiner ou non la surface de la soudure afin de lui donner une section géométrique pure pour obtenir une mesure convenable (Fig. 2).

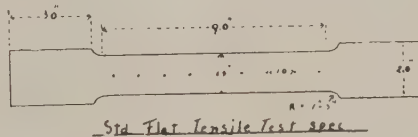
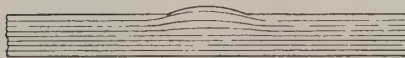


Fig. 2

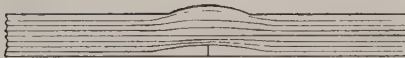
Eprouvette plate

Longueur utile: 230 m/m.

Largeur de la section: 38 m/m.



SKETCH A



SKETCH B

Fig. 3

Distribution des lignes de traction
à travers la soudure

A. Conditions normales.

B. Avec entaille au fond.

Les renseignements que l'on obtient dans cet essai dépendent du type de la soudure. Prenons d'abord le cas de la *soudure dont le renforcement n'a pas été enlevé* (fig. 3). L'effort de traction est appliqué au joint, et quand on arrive à une certaine valeur de cet effort, commence un certain allongement important et permanent. A cause de la plus grande limite élastique et de la plus forte section au droit de la soudure, l'allongement initial



Fig. 4
Eprouvette pour l'essai à traction avant et pendant l'application de l'effort

permanent se produit d'abord dans la tôle. Dans la plupart des cas, l'allongement commence en un point de la tôle où la chaleur de la soudure a produit une température juste inférieure à la température critique, ce qui produit un adoucissement de l'acier à cause du recuit subcritique. Après cela les échantillons s'allongent davantage (fig. 4). Avec l'augmentation de la force appliquée, c'est-à-dire pour une valeur notablement plus grande que la limite élastique de la tôle, la tension atteint la limite élastique de l'acier de la soudure elle-même. Malheureusement il n'y a pas de méthode pratique pour déterminer quand on arrive exactement à cette limite élastique, à cause de la nature des relations géométriques de la soudure et de la tôle.

Des extensomètres très sensibles (HUGGENBERGER) avec multiplication de 1200 et une longueur de mesure de 10 m/m. ont été placés par l'auteur à travers la section plus épaisse du « V » de la soudure. Même avec cet appareil, il n'a pas pu déterminer la valeur absolue de la tension entre deux points, à cause des moments de flexion produits par la forme spéciale de la section de la soudure.

Ce qui précède se produit même dans l'absence du *renforcement de la soudure*. Toutefois, l'auteur a calculé avec pas mal de précision la limite élastique de l'acier de la soudure par la méthode suivante. Au lieu de se servir de l'effort total indiqué par la machine à essai, l'auteur a mesuré la force au moyen de la déflexion élastique jusqu'à la limite élastique et il a supposé que le module d'élasticité de l'acier de la soudure est le même que celui de l'acier normal; il est alors très simple de calculer la tension. Ce mode d'essai n'est donc utilisable que lorsqu'on a enlevé le renforcement d'épaisseur de la soudure. Malheureusement, cette méthode n'est pas, en général, bien satisfaisante, parce qu'une toute petite portion seulement de la soudure est essayée, c'est-à-dire la région comprise entre les pointes de l'extensomètre; et à cause de l'hypothèse faite au sujet du module d'élasticité. Autant que sache l'auteur, on n'a jamais employé cette méthode dans les ateliers, mais seulement dans des essais spéciaux de laboratoire.

Un autre moyen de déterminer la limite élastique est de pré-

parer un échantillon avec le renforcement enlevé et avec les côtés non parallèles, mais usinés suivant les arrondis tels que fig. 5. Ainsi la section à travers les échantillons au centre du V de soudure est moindre qu'à n'importe quel autre endroit

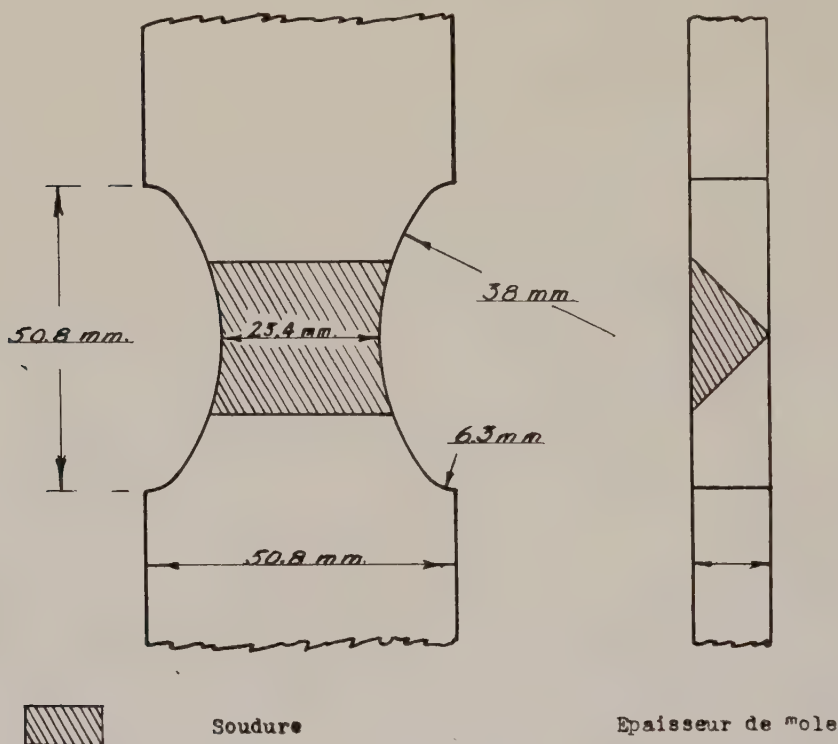


Fig. 5

Eprouvette à section étranglée pour l'essai de traction

** Calcul d'après les allongements indiqués par les extensomètres.

et naturellement la tension par millimètre carré y est plus grande. Ainsi la déformation élastique initiale de tout l'échantillon sera bien celle de la soudure même. Il y a, cependant, des difficultés avec cette méthode, mais du point de vue pratique c'est probablement la meilleure pour mesurer la limite élastique de la soudure. On peut craindre, en effet, que la tôle n'ait pas une limite élastique suffisamment plus élevée que le métal de la

soudure, pour que les conditions nécessaires à l'exactitude de la méthode soient remplies. En effet, dans la plupart des échantillons même quand la section à travers la soudure est légèrement réduite, l'allongement initial se produit dans la tôle elle-même. Une autre difficulté est due à la courbure des côtés de l'échantillon qui produit une concentration de force toute spéciale, et dans le calcul de la division simple de l'effort total de traction par l'aire de section transversale, on n'aura qu'une tension moyenne au lieu de la tension vraie en chaque élément de ladite section. Mais, au moins, la valeur obtenue par cette méthode est assez bonne pour qu'elle soit employée de préférence, quand on désire mesurer plus particulièrement la limite élastique.

Le Tableau I indique des résultats que j'ai obtenus par cette méthode.

TABLEAU I

*Distribution des tensions à travers l'éprouvette
à section étranglée de la figure 5.*

EPROUVETTE	TENSION *	TENSION **	TENSION **
	MOYENNE Kg./mm. ²	SUR LES COTÉS Kg./mm. ²	AU CENTRE Kg./mm. ²
1	28.2	28.3	28.2
2	27.9	28.0	27.8
3	28.4	28.5	28.4
4	39.6	39.7	39.5
5	39.9	40.1	39.8
6	40.0	40.1	39.9
7	53.4	53.6	53.2
8	53.5	53.8	53.3
9	53.3	53.6	53.1

* Calcul de l'effort total enregistré à la machine à traction.

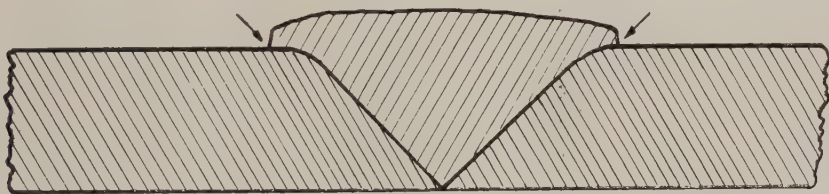
** Calcul d'après les allongements indiqués par les extensomètres.

On pourrait penser d'après ce qui vient d'être dit, que la détermination précise de la limite élastique du métal de la soudure dans un joint, pour le cas d'une traction à angle droit avec la ligne de la soudure causera de grandes difficultés à l'ingénieur constructeur; mais il n'en est rien. En effet, du fait même que l'essai, tel qu'indiqué précédemment, est difficile, c'est-à-dire du fait même que la limite élastique de la tôle est en général bien moindre que celle du métal de la soudure, il n'y a pas de nécessité pour l'ingénieur constructeur de connaître avec précision la limite élastique du métal de la dite soudure. Heureusement, la détermination de *la résistance à la rupture par traction de l'acier de la soudure* est un problème bien plus simple. Quand on prépare les échantillons sans enlever le renforcement (comme utilisé en service) la rupture peut se produire dans une des trois régions suivantes: 1° dans la tôle pas loin de la soudure; 2° dans la zone recuite tout à fait voisine de la soudure; 3° dans la soudure elle-même. Si la cassure se trouve dans la zone recuite, le résultat est tout simplement celui de l'acier laminé ordinaire et on obtient au moins une information sur la résistance du joint dans son ensemble. On ne sait pas, il est vrai, de combien plus grande est la résistance du métal de soudure, mais dans beaucoup de cas cela n'a pas d'importance. Cependant, quand il est nécessaire de connaître exactement la résistance de la soudure même en kilogrammes par millimètre carré, il faut se servir de méthodes spéciales d'essai comme l'éprouvette à section étranglée de la fig. 5. Si la rupture se fait très près de la soudure, la valeur trouvée peut être celle de la tôle soudée, plus ou moins, selon l'effet de la chaleur lors du soudage. Elle est plus grande seulement dans des cas bien rares, parce que si la rupture ne se produit pas dans la soudure même, elle se produit pratiquement toujours dans la zone recuite qui a une résistance moins grande que le reste de la tôle.

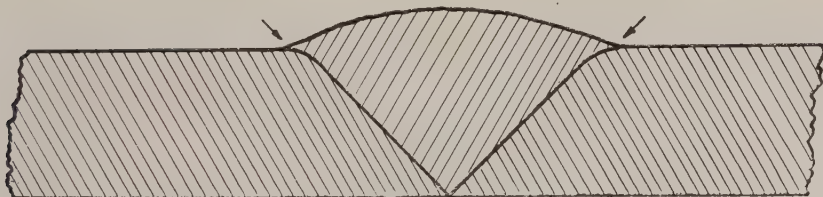
Cette zone recuite de la tôle est celle qui est très proche, de part et d'autre, du métal d'apport de la soudure; elle se trouve normalisée, alors qu'un peu au-delà, le métal de la tôle a subi un effet durcissant de vieillissement.

Des valeurs moindres se présentent quelquefois et notamment

dans les deux cas suivants: 1° production d'acier surchauffé et brûlé pendant le soudage; il se produit des fissures initiales et, lors d'un essai de traction, la rupture a lieu sous un effort moindre; 2° concentration des efforts de tension tout à côté de la soudure. Cette concentration se produit quand le métal de renforcement de la soudure rencontre la tôle initiale en faisant avec sa surface un angle plus petit qu'il n'est nécessaire (Voir le



Renforcement avec angle trop aigu



Renforcement correct.

Fig. 6

croquis fig. 6). Ainsi, tandis qu'on peut obtenir des valeurs bases quand la rupture se trouve très voisine de la soudure, ici la tension en une certaine région bien localisée est particulièrement haute. Si la rupture se trouve dans la soudure même, dans le cas du renforcement enlevé, il n'y a pas de difficulté parce que nous avons une section géométrique bien déterminée, la rupture a lieu en un point bien défini, et on peut bien déterminer la résistance en kilog. par millimètre carré du métal de la soudure. Mais dans la plupart des cas, le métal déposé a plus de résistance que la tôle de base. Ainsi, en général, une rupture



Fig. 7
Machine à traction fermée dans son étui.



Fig. 8

Machine à traction prête pour l'essai

dans la soudure indiquera un travail de soudage de qualité inférieure plutôt qu'une qualité inférieure du métal déposé lui-même. Naturellement il y a des exceptions; par exemple le soudage de tôle en acier demi-dur à 50 kgs par mm², avec un barreau d'acier doux donnant donc un métal d'apport à 38 kgs seulement; mais dans l'industrie on ne rencontre ce cas que rarement.

Pour faire l'essai de traction d'une façon convenable sans ap-

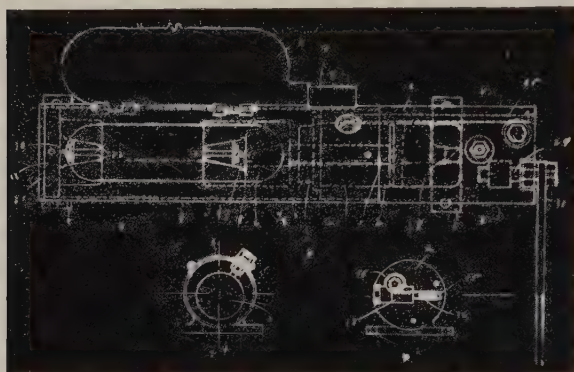


Fig. 9

Machine à traction portable

porter l'éprouvette dans un laboratoire à essais mécaniques, l'auteur a imaginé et construit une machine à traction qui ne pèse que 75 kilogs et qui développe une force de 20 tonnes au moyen d'un levier à main; cette machine est représentée dans les figures 7, 8, 9.

La mâchoire mobile est mue par un piston qui se déplace dans un petit cylindre où on envoie de l'huile à l'aide d'une petite pompe manœuvrée par un levier à main; cette pompe est établie dans le corps même de tout l'appareil. La pression totale exercée se lit sur un cadran.

Dans l'essai à la traction ordinaire d'un métal homogène on

n'obtient pas beaucoup d'information sur la ductilité au pliage, au tréfilage, etc.. et dans l'essai à la traction d'un barreau avec soudure, l'information sur la ductilité est nulle à cause des mêmes raisons qui ont été indiquées au sujet de la détermination de la limite élastique. En général le métal de la tôle s'allonge avant celui de la soudure et la détermination de l'allongement du métal déposé dans un V est presque impossible. Presque toutes les éprouvettes soudées montrent des réductions de section de part et d'autre de la soudure et non pas dans le métal déposé. Evidemment si l'éprouvette casse en dehors de la soudure, le métal déposé n'a jamais été tendu au maximum. De plus, quand une rupture se trouve dans le métal déposé la combinaison des allongements entre la surface et le fond du V et les tôles adjacentes est tellement compliquée qu'il est impossible d'obtenir une valeur absolue. L'auteur a beaucoup réfléchi à cette question et il a eu l'idée de recourir à un essai quantitatif à la flexion pour mesurer l'allongement du métal d'apport d'une soudure.

L'ESSAI DE FLEXION QUANTITATIF

L'essai de flexion est bien connu des métallurgistes et il a été appliqué depuis bien longtemps pour se rendre compte notamment de la ductilité, et bien qu'il ne fut pas utilisé avec une grande précision. En général, en effet, on pliait une éprouvette quelconque par des coups de marteau ou par pression continue de façon à la cintrer autour d'une tige d'un diamètre déterminé (voir fig. 10); on note alors l'angle formé par les deux jambes de l'éprouvette juste avant la rupture.

Avec un métal mou, comme du cuivre, le barreau s'arrondit exactement sur le rond P; mais avec de l'acier, il n'en est pas ainsi, comme le montre le croquis 3 de la figure 10.

L'échantillon s'allonge localement dès qu'une toute petite région arrive à la limite élastique. Ainsi l'échantillon ne reste pas sur la surface du boulon, et l'angle des jambes est fonction de beaucoup de facteurs différents et non pas simplement de la

ductilité du métal donné. J'ai résolu ce problème en précisant ce qu'on voudra dire par le terme ductilité. Ce sera l'extension des fibres de la surface au moment de la rupture quand l'échantillon est

Figures pour montrer comment un barreau d'acier se sépare du rond *P* pendant l'essai au pliage

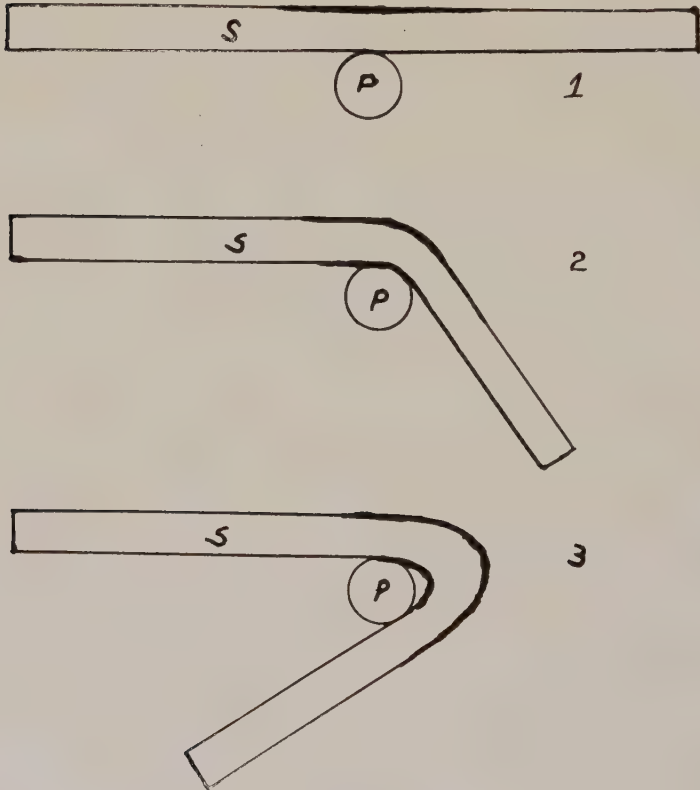


Fig. 10

S. Eprouvette.

P. Boulon.

1. 2. 3. Positions successives pendant la flexion.

soumis au pliage. Pour arriver à mesurer cela directement, l'auteur a imaginé l'essai de flexion libre, qui est maintenant adopté comme essai-type par l' « American Society for Testing Mate-

rials », et se trouve dans le code de l' « American Society of Mechanical Engineers ».

L'essai consiste à opérer comme l'indique la figure 13, sans utiliser le rond P de la figure 10. La forme de la section du barreau essayé a une influence considérable sur les conditions d'extension des fibres. Ainsi, si la section initiale est rectangulaire, elle ne le reste pas, mais prend la forme de la figure 11; du côté extérieur (en haut dans la fig. 11) il y a contraction, du côté inférieur (en bas de la fig. 11) il y a élargissement. La contraction du côté extérieur diminue la tension des fibres et leur permet de s'allonger davantage avant la rupture.

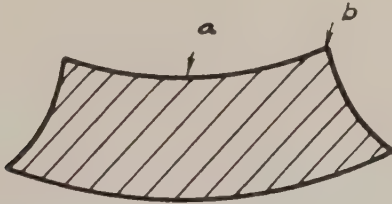


Fig. 11

Forme prise par une section rectangulaire
après flexion.

J'ai étudié cette question au laboratoire et les résultats se trouvent dans les colonnes du tableau II. On peut voir de suite d'après ce tableau, que l'effet du relâchement de la tension à la deuxième dimension n'a plus d'effets si la largeur de l'échantillon est égale au moins à trois fois son épaisseur; dans ces conditions, les valeurs obtenues sont satisfaisantes dans les limites de précision désirée.

TABLEAU

TABLEAU II

*Pour cent d'allongement à la flexion
des barreaux de deux aciers de plusieurs dimensions.*

LARGEUR mm.	EPAISSEUR mm.	POUR CENT D'ALLONGEMENT	
		Acier 1	Acier 2
—	—	—	—
6.3	6.3	48	91
12.7	6.3	44	82
19.0	6.3	37	75
25.4	6.3	39	74
37.7	6.3	39	76
50.8	6.3	37	72
12.7	9.5	46	87
19.0	9.5	44	80
25.4	9.5	39	75
37.7	9.5	38	72
50.8	9.5	39	74
19.0	12.7	45	90
25.4	12.7	43	83
37.7	12.7	39	71
50.8	12.7	39	74
19.0	19.0	46	
37.7	19.0	42	
63.5	19.0	37	
89.0	19.0	38	

Nota. — Il faut remarquer qu'avec une largeur égale au moins à trois fois l'épaisseur, les % d'allongement sont indépendants des dimensions de la section de l'éprouvette.

On peut mesurer l'allongement des fibres extérieures de plusieurs façons. La façon la plus directe consiste à placer des marques à des distances déterminées sur l'échantillon avant la flexion, puis à mesurer les distances finales entre ces marques avec une règle graduée flexible. Pour déterminer l'influence de la longueur de la distance entre les marques sur les valeurs finales, j'ai fait des échantillons dans lesquels j'ai inscrit des marques

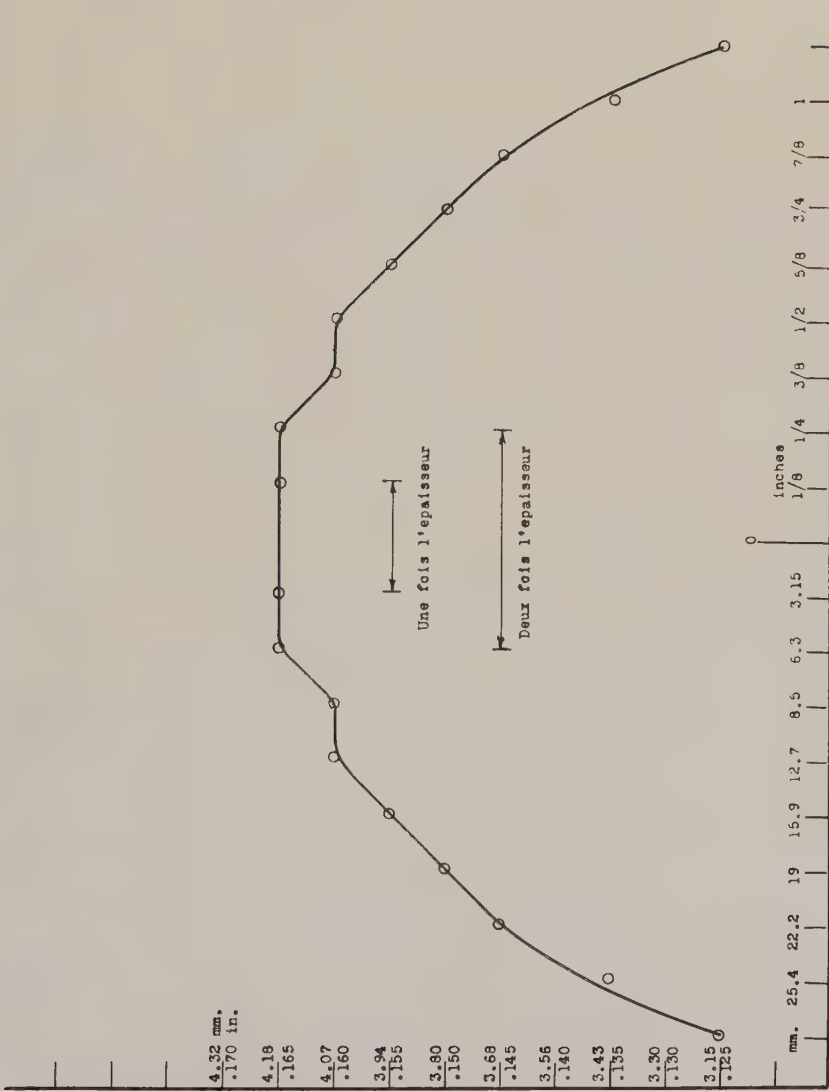


Fig. 12

Distance après flexion entre des marques placées sur une éprouvette de flexion distante de 3 m/m. les unes des autres.

Distance de la marque à partir du centre de la section
vs.

chaque 3 mm. par exemple et j'ai construit les courbes montrant le pourcentage d'allongement des fibres en fonction des distances initiales entre les marques. Une courbe-type est représentée figure 12 et on peut voir de suite d'après cela que cette distance doit être de une à deux fois l'épaisseur de l'échantillon pour obtenir sans difficulté des valeurs avec une très bonne précision.

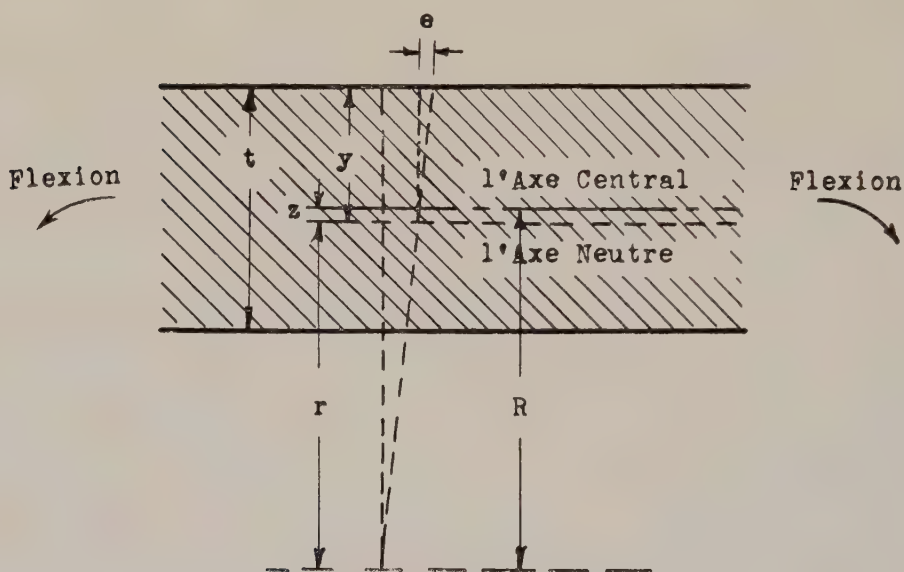


Fig. 13

Souvent on désire plier les échantillons sans y mettre de marques. Dans ce cas, pour déterminer l'allongement des fibres extérieures du rayon, on peut opérer de deux façons; soit en traçant la courbe et déterminant le rayon comme le montre la figure 16 ou bien en se servant d'un instrument qui mesure la distance d'un arc de la corde du cercle. Une fois qu'on a établi la dimension du rayon, on calculera les allongements des fibres au moyen de formules qui tiennent compte des mouvements de l'axe neutre, (voir fig. 13).

Ces formules sont les suivantes:

e = allongement de la fibre extérieure
y = distance de l'axe neutre à la surface
R = rayon de l'axe central
r = rayon de l'axe neutre
Z = déplacement de l'axe neutre de l'axe central
t = épaisseur de l'éprouvette
x = rapport du rayon de l'axe neutre à l'épaisseur

$$e = \frac{y}{r}, \quad y = \frac{t}{2} + Z, \quad r = R - Z, \quad Z = \frac{t^2}{12R}, \quad R = xt;$$

donc :

$$e = \frac{6x + 1}{12x - 1}.$$

On peut faire le calcul chaque fois directement ou bien on peut le faire à l'aide d'une échelle fixée directement à l'instrument, à l'aide desquels on mesure la distance à la corde. L'auteur a fabriqué cet appareil et l'appelle *extensomètre de flexion*; la photographie de cet instrument est reproduite figure 14. En plaçant l'instrument sur l'échantillon, la tige conique centrale est déplacée en hauteur d'une distance correspondant à celle qu'il y a entre l'arc et la corde. On lit alors la position de l'aiguille sur le cadran et on multiplie le chiffre par l'épaisseur de l'échantillon. Cette valeur est alors transposée de l'échelle intérieure à l'échelle extérieure, échelles inscrites sur le cadran de l'extensomètre. La valeur donnée sur l'échelle extérieure est l'allongement % de la fibre, parce que les deux échelles correspondent aux formules données précédemment. Ainsi la détermination de l'allongement à la flexion devient très commode.

Il faut faire une mention spéciale de la méthode de flexion. Pour faire la flexion de la façon la plus convenable, on donne d'abord une légère courbure aux extrémités du barreau, comme on le voit figure 15, au moyen d'un marteau ou bien par pression loin de la soudure pour qu'elles n'aient pas d'effets sur la flexion finale. En outre, elles doivent être à la même distance de part et d'autre de la soudure de façon que la déformation maximum par

pliage se produise bien dans le métal d'apport de la soudure. Ensuite, on fait travailler l'éprouvette entière à la compression d'où flambage et la flexion se fait comme désirée. Par exemple, l'échantillon qui comprend le joint soudé est plié avec la soudure



Fig. 14
Extensomètre à flexion

dans le milieu, et avec la section plus grande du V à la surface extérieure; on continue l'effort jusqu'à ce que la rupture se montre dans la soudure. On peut facilement observer la soudure pendant tout le temps de l'essai et l'expérience montre qu'il n'y a pas de difficulté pour apprécier l'instant d'un commencement de rupture avec une très bonne précision et

alors on ne plie pas davantage (fig. 16). Il y a des cas où on ne pourra pas appliquer cet essai ; mais, heureusement, c'est qu'il n'y aurait pas une grande utilité à être fixé sur ce qu'il aurait pu donner. Un tel cas se présentera si la soudure est faite sur tôle très mince, ou bien encore si le métal d'apport est de l'acier extra-doux ; en effet, on peut alors plier la jonction à bloc sans

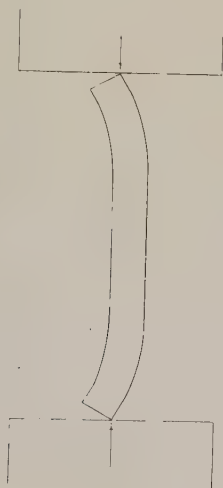


Fig. 15

Eprouvette de flexion,
préparée pour l'appli-
cation d'un effort de
compression et flam-
bage.

criquer. Dans ces cas on ne peut pas mesurer les allongements maximum possibles, mais on sait tout de suite qu'il n'y a point de condition de flexion qui, dans la pratique, risque de produire une rupture dans la soudure. Un autre cas où l'essai ne donnera pas de résultats se présentera quand la soudure est tellement fragile que la rupture se fait à l'instant même de l'application de l'effort et avec un allongement si petit qu'on ne peut pas le déterminer avec précision. Dans ce cas, la ductilité est si basse que son chiffre précis n'a pas d'intérêt et on prendra zéro pour sa

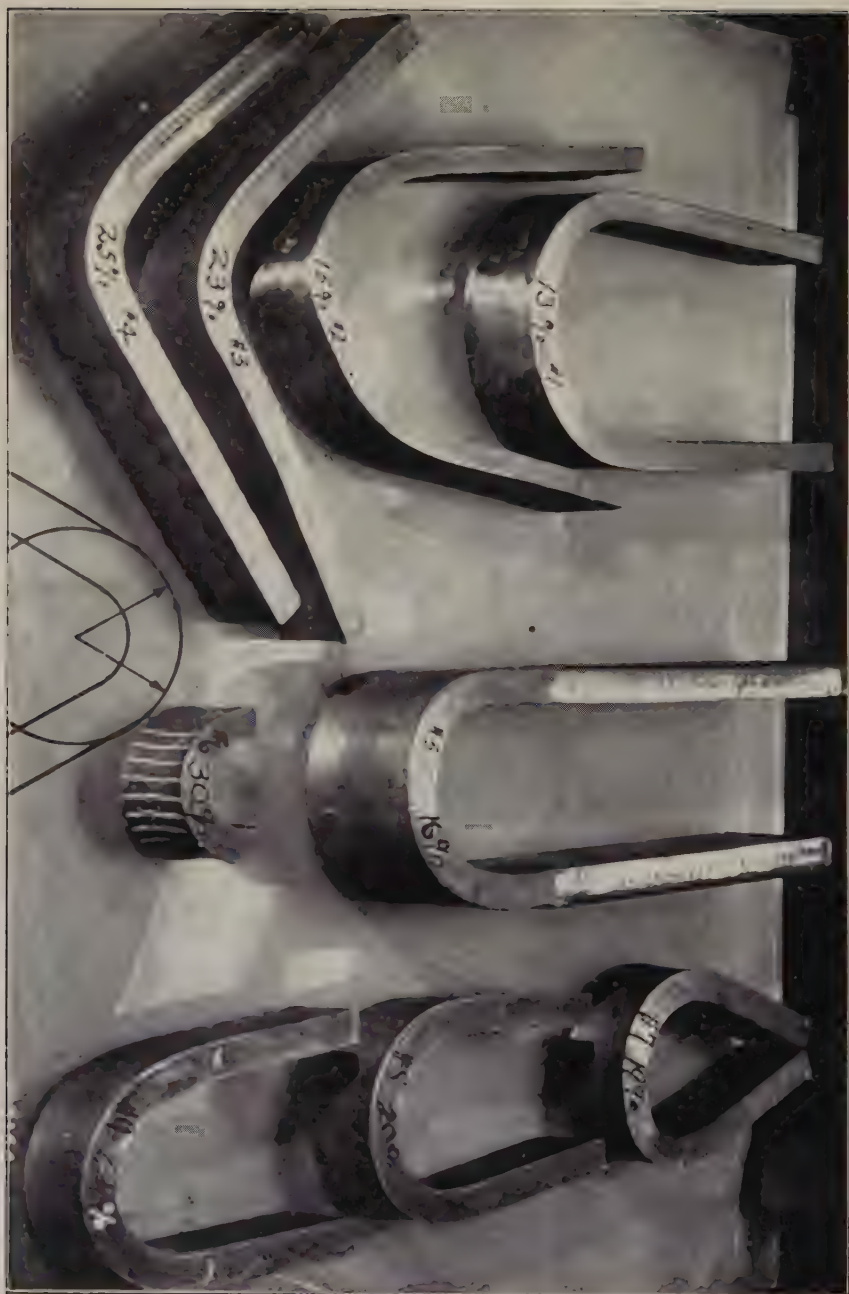


Fig. 16

valeur. Une telle soudure ne devra pas être employée dans la construction. Enfin, un cas plus gênant sera celui où la résistance du métal d'apport de la soudure est si grande par rapport au métal de la tôle, qu'à l'essai de flambage la plus grande partie des allongements se produira dans le métal de la tôle et il y en aura très peu dans le métal de la soudure qui sera donc tendu à un taux plus ou moins éloigné de la rupture. Pour l'instant l'auteur n'a pas perfectionné une méthode d'essai satisfaisante pour des soudures de ce genre.

Une méthode qui a été employée par l'auteur consiste à fixer des parties de renforcement sur les côtés du barreau de part et d'autre et tout près de la soudure. Dans ces conditions, à cause de l'épaisseur plus grande de l'échantillon en dehors de la soudure, on augmente la déformation dans la soudure et la plus grande flexion s'y produit bien. Heureusement, ce cas est rare et il ne sera pas souvent nécessaire de se servir de cet expédient. Il y a un autre avantage dans l'essai de flambage appliqué aux soudures. On soumet à l'essai non seulement le métal déposé d'une façon directe, mais à cause de la nature des moments de flexion, qui diminuent comme la distance de la surface à l'axe neutre augmente, de petites imperfections de la surface (qui causeraient une rupture complète tout de suite dans l'essai de traction) ne donnent que de tout petits trous ou criques dans l'essai de flexion, et cela n'amorce pas une rupture prématurée. Ainsi on obtient une idée meilleure des propriétés du métal déposé.

L'ESSAI DE DURETÉ

Au point de vue des cas de la pratique courante, où l'acier des barres à souder et l'acier d'apport ont la même dureté, on ne peut obtenir que peu d'informations au moyen d'essais de dureté faits respectivement sur la soudure et sur le métal voisin. Mais on peut obtenir beaucoup d'indications intéressantes avec cet essai en étudiant des types nouveaux de nuance du métal d'apport, par exemple, un apport en acier dur. La chose essentielle dans un essai de dureté dans un tel cas sera qu'il soit tout à fait

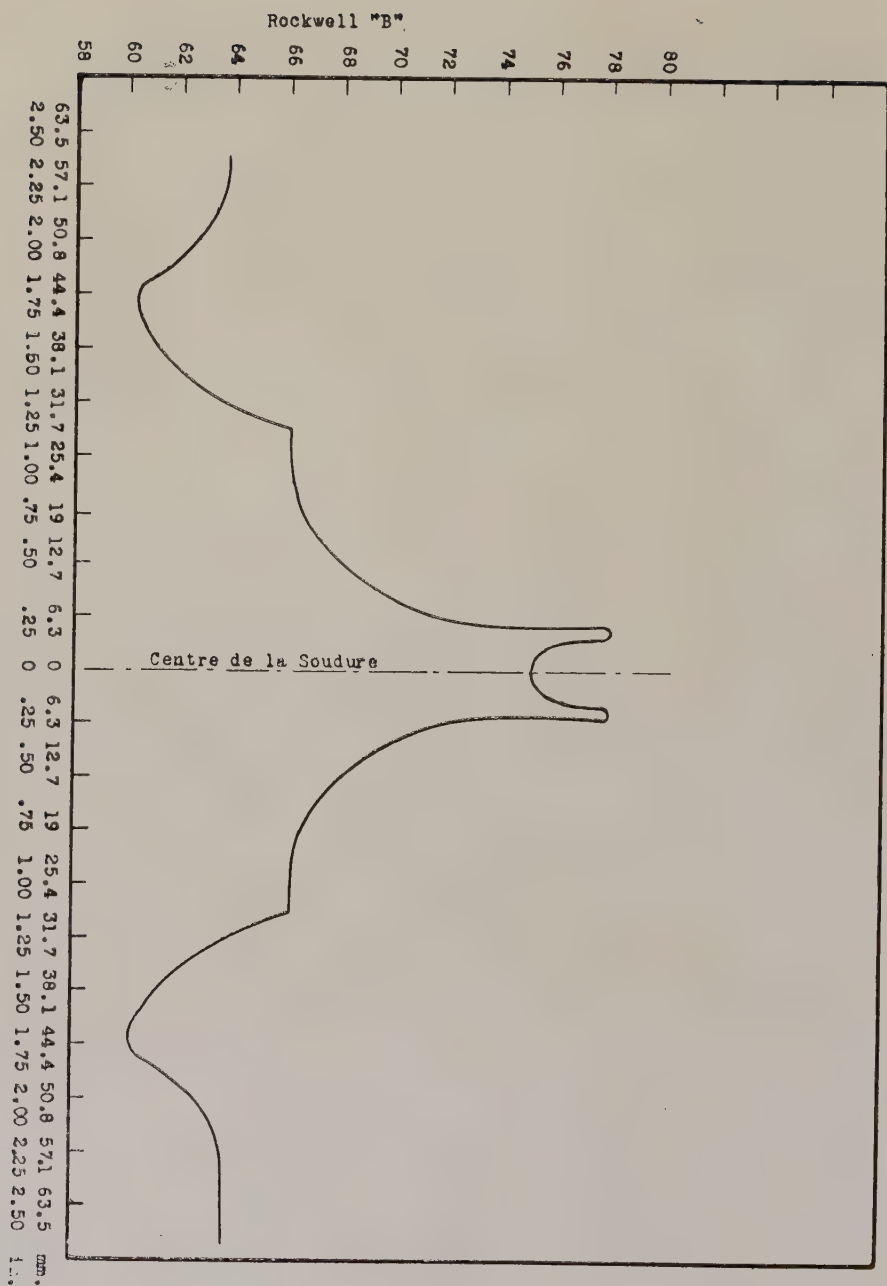


Fig. 17

Variation de la dureté à travers une soudure typique.

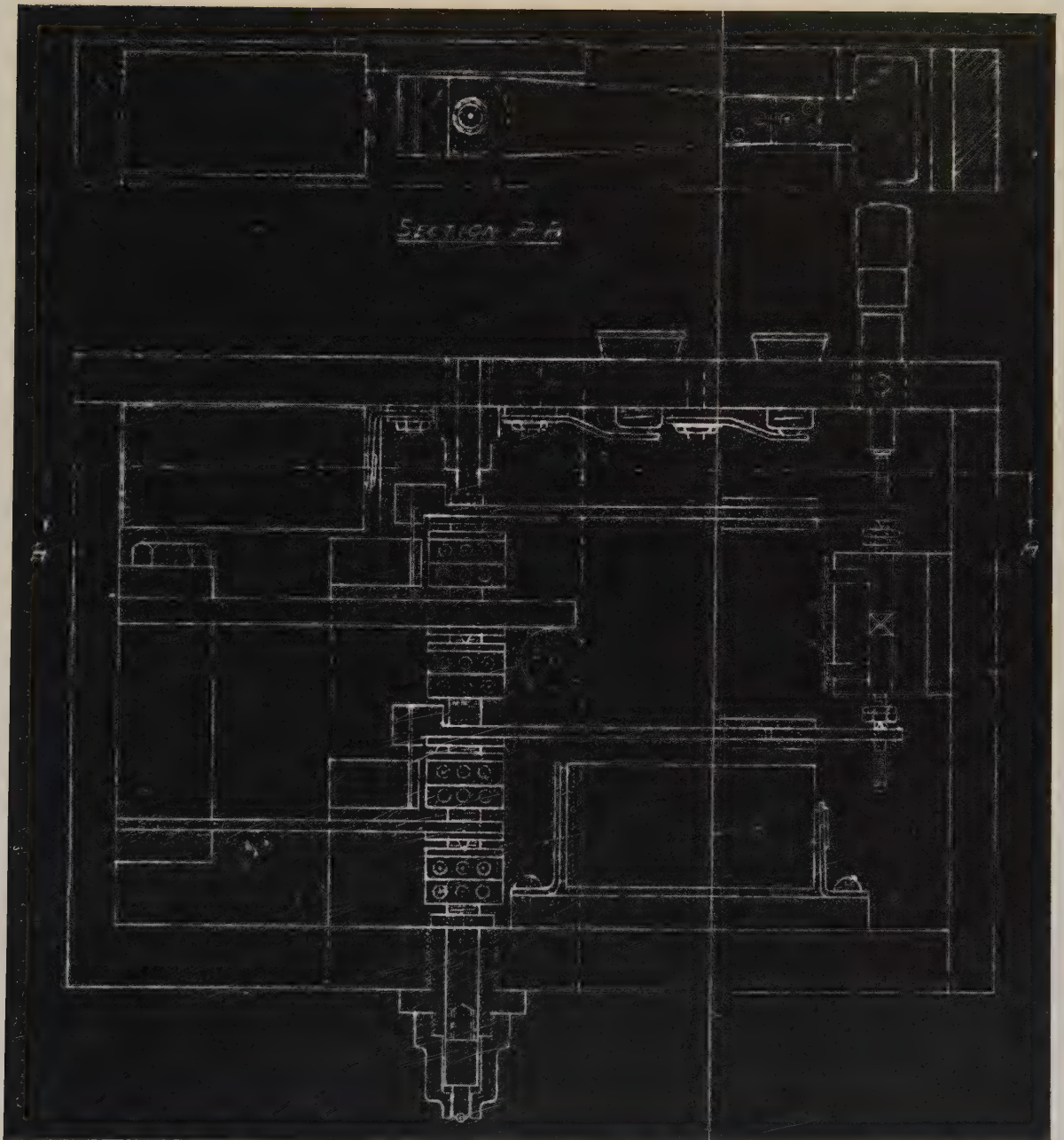


Fig. 18

local. La machine Rockweell semble être la plus convenable, mais le scléroscope est également souvent employé. Des nombres de dureté typiques que l'auteur a relevés à travers une soudure, sont donnés dans la figure 17. De ceci on peut voir que les différentes zones dans un joint soudé sont bien définies par leur dureté ainsi que par leurs autres propriétés. Quand on parle du dépôt d'une couche d'acier dur, il est souvent surtout nécessaire de faire l'essai au point de service, par exemple, quand on durcit la surface de roulement des rails de chemins de fer par dépôt d'acier en fusion. Pour cela, il faut avoir un appareil facilement transportable. Le scléroscope convient à cette application, mais il y a des difficultés à obtenir des mesures précises.

L'auteur a imaginé et construit une machine à essai de ce genre qui donne des mesures précises. Le principe ainsi que la construction sont montrés dans la figure 18 et l'opération se fait comme suit. La machine entière est pressée sur l'acier, de sorte que la surface annulaire reste bien sur la surface qu'on soumet à l'épreuve. Dans cette position, le ressort appliqué à la tige centrale immobilise la bille et la position de la bille est enregistrée par l'extrémité d'un levier qui place un petit cylindre dans la position de zéro. Le cylindre y est maintenu par friction. Une came est tournée et la force du ressort le plus grand est appliquée à la balle. Le petit ressort donne une force d'à peu près 4 kg. 5 et le ressort principal 45 kg.. La balle est ainsi pressée contre l'acier à une profondeur qui dépend de la dureté. Le levier supérieur suit cette position, en déplaçant un second cylindre. On enlève ensuite la force du ressort supérieur au moyen de la came et on peut alors enlever l'instrument. Au moyen d'un micromètre on établit un contact électrique avec le cylindre supérieur, ce qui allume la première lampe. On observe la position et on avance le micromètre jusqu'à ce que la seconde lampe s'allume. Alors on lit la différence des deux positions du micromètre et on la traduit en dureté Brinell, ce qui donne une indication pour l'emploi envisagé. Un tel essai peut être considéré comme un essai non destructif.

ESSAI DE FATIGUE

On a beaucoup pensé à la résistance à la fatigue des soudures ainsi qu'aux effets des petites imperfections de la soudure sur cette résistance. La méthode ordinaire de faire ces essais par fatigues rotatives consiste à usiner un échantillon suivant les types Farmer ou Moore, avec la soudure au milieu du barreau (voir fig. 19). Une autre méthode consiste à prélever le barreau dans la longueur de la soudure de sorte qu'il soit entièrement formé du métal d'apport. Les résultats obtenus au laboratoire avec cet essai par l'auteur, tel que ceux du tableau III ci-contre, ainsi que par d'autres expérimentateurs sont très variables, ce qui indique que la présence de très petits défauts a une influence considérable sur les résultats. Ces résultats et les conclusions qu'on en peut tirer seraient vraiment déconcertants ; et cependant pendant les quelque vingt années d'emploi courant du soudage dans l'industrie jusqu'à maintenant, on ne connaît pas un seul cas de soudure qui se soit mal comporté en service à la suite d'une rupture par fatigue. Même si ces faits sont contraires à nos idées théoriques, il faut les accepter comme tels, et il faut conclure que la résistance à la fatigue d'une soudure n'est pas un facteur prépondérant d'appréciation pour la pratique. Donc, si l'acier d'apport qu'on emploie pour la soudure est du même genre que ce qu'on a employé dans le passé, il n'y a pas lieu, au point de vue de l'ingénieur constructeur, d'étudier spécialement la résistance à la fatigue avec des échantillons de laboratoire. C'est une conclusion peu satisfaisante et on devra rechercher des moyens mieux capables d'apprécier la résistance à la fatigue des soudures, en vue d'apprécier les services que peuvent donner les soudures dans l'industrie. Une méthode possible pourrait consister à faire des essais par traction directe sur de grands échantillons, avec une force appliquée alternativement variable entre certaines limites. On peut utiliser pour cela une machine Amsler ou analogue à pulsations et on a commencé à travailler dans cette direction. Malheureusement la nature de cette étude est telle qu'il faudra au moins deux années avant d'obtenir des résultats définitifs permettant de se rendre compte si cette méthode peut donner ce qu'on en espère.

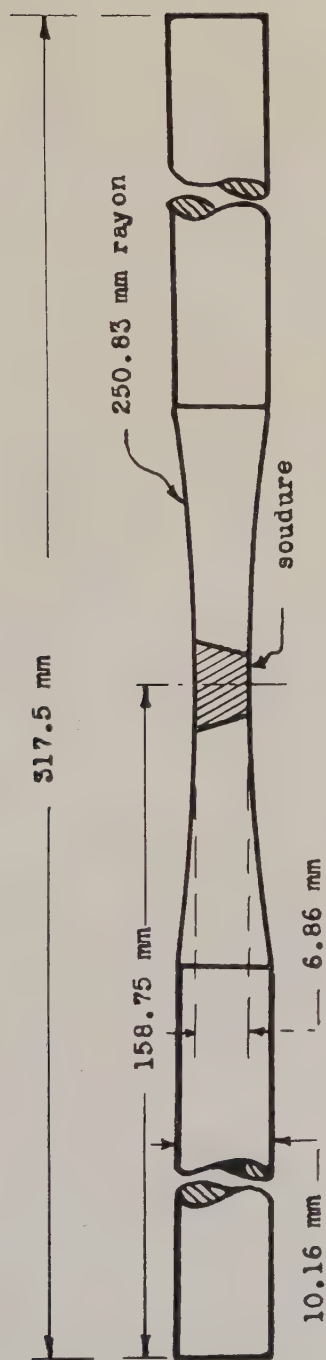


Fig. 19

Eprouvette à fatigue rotative

TABLEAU III

*Essai à la fatigue des soudures
avec éprouvette illustrée en fig. 19.*

ÉPROUVETTES à 58.1 Kg./mm ² Résistance —	TENSION maximum Kg./mm. ² —	NOMBRE DE RÉVOLUTIONS à cassure —
1	24.6	340,000
2	24.6	1,520,000
3	24.6	110,000
4	24.6	960,000
5	21.2	3,650,000
6	21.2	680,000
7	21.2	2,550,000
8	21.2	1,290,000
9	17.6	4,870,000
10	17.6	8,980,000
11	17.6	10,000,000*
12	17.6	2,120,000

ÉPROUVETTES
à 35.6 Kg./mm²
Résistance
—

21	21.2	80,000
22	21.2	190,000
23	21.2	60,000
24	21.2	240,000
25	14.1	4,250,000
26	14.1	10,000,000*
27	14.1	10,000,000*
28	14.1	2,850,000

* Pas cassée.

L'ESSAI DE RÉSILIENCE

On pourrait croire que les essais de résilience ont beaucoup d'importance dans l'appréciation des soudures. Dans l'essai standard fait par l'appareil Izod ou le mouton-pendule Charpy avec des sections d'un centimètre carré et des entailles comme dans les essais sur l'acier laminé, on placera l'entaille au centre de la soudure, ou bien à un endroit quelconque désiré. Ici, toutefois, il y a une grande difficulté d'interprétation des résultats obtenus sur des éprouvettes, qui sont de largeur faible, donc de longueur de partie soudée faible, alors qu'en pratique, on a généralement des joints soudés qui ont une grande longueur.

Un autre point important est l'influence de la vitesse d'application des efforts; par exemple des échantillons de tôle-chaudière après vieillissement ont été éprouvés au laboratoire avec des barreaux standard Izod. Quand on fait tomber le marteau de la hauteur correspondant à l'application d'une énergie de 120 ft. lbs (16 kgm. 6) il y avait une absorption d'énergie de 4 ft. lb. (0 kgm. 55) par barreaux. Puis, sur des échantillons identiques, on a fait tomber le marteau-pendule d'une hauteur correspondant à une énergie de 4 ft. lbs (0 kgm. 55) mais alors l'éprouvette ne casse pas. Quand on fait tomber le pendule de hauteurs croissantes jusqu'à celle correspondant à 30 ft. lbs (4 kgm. 15) les échantillons ne cassent pas, mais quand on fait tomber le marteau de la hauteur correspondant à 32 ft. lbs (4 kgm. 43) on casse les échantillons avec absorption d'un travail de 30 ft. lbs (4 kgm. 15), et quand on fait tomber le marteau de plus grande hauteur jusqu'à 120 ft. lbs (16 kgm. 6) le travail absorbé par l'échantillon en cassant, diminue de façon continue. Cela est démontré sur la figure 20. Il faut se demander quelle est la résilience de cette matière? Le facteur de masse se démontrera de façon analogue. J'ai essayé deux aciers au choc, en y découpant des éprouvettes du type standard Izod; j'ai fait des échantillons à moitié et à double largeur et les ai essayés avec la même machine. Les résultats que j'ai obtenus se trouvent dans le tableau IV et on peut voir que dans le cas de l'acier 1 la résilience augmente avec la section, tandis qu'avec l'acier 2 elle est sensiblement constante quoique

dans l'échantillon standard l'énergie absorbée par l'acier 2 était plus grande que celle absorbée par l'acier 1. Alors, d'après l'é-

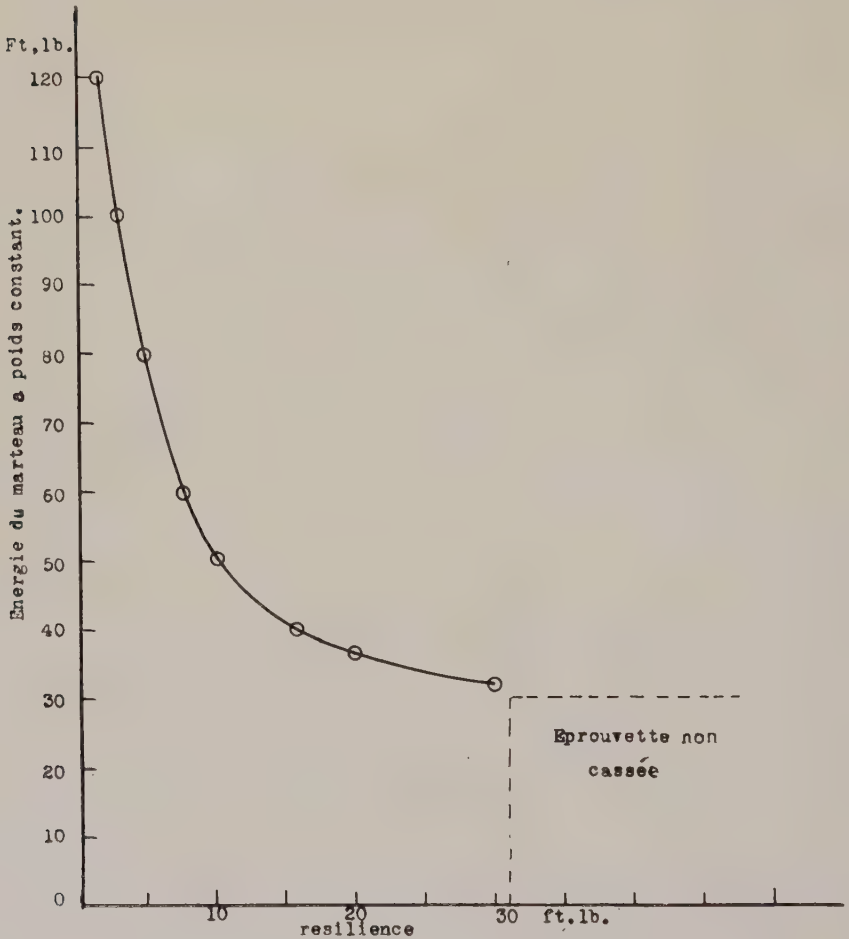


Fig. 20

Résilience de l'acier
en fonction de l'énergie du marteau de poids constant.

chantillon standard seulement, on dira que l'acier 2 est plus convenable pour le service que l'acier 1. Mais avec une augmentation de la masse et de la section, le 1 est bien supérieur au 2. S'il y a

en service une masse relativement grande l'acier 1 aura plus de résilience que l'acier 2. Ainsi, il y a tant de facteurs compris dans la résilience que, jusqu'à présent, on n'a pu obtenir un essai de résilience satisfaisant. Peut-être qu'une série d'essais au lieu d'un seul essai renseignerait mieux. Dans une étude de recherche on peut faire cela, mais il serait difficile de le faire dans la pratique industrielle. C'est là encore un problème non résolu dans les essais de soudure. Il faut ajouter que ce problème est aussi sans solution par rapport aux essais de l'acier laminé. En général, les services ne donnent pas aux soudures un choc comparable à l'essai à la machine Izod ou Charpy. En plus, les appareils soudés en service montrent qu'il y a une bonne corrélation entre la ductilité à la flexion et les cassures fragiles. Aussi, du point de vue de l'ingénieur constructeur les questions de résilience et de ductilité sont suffisamment éclairées par l'essai de flexion.

TABLEAU IV

Résilience des deux aciers essayés à la machine Izod avec des éprouvettes de 5 mm., 10 mm. et 20 mm. de largeur, épaisseur de 10 mm. et entaille normale.

Résilience en ft. lbs.

Largeur des éprouvettes	5mm.	10mm.	20mm.
Acier 1	8	14	30
Acier 2	19	22	21
Acier doux normal.	26	46	101
Métal déposé	9	16	30

Valeur enregistrée à la machine et non rapportée à la section de l'éprouvette. Chaque valeur est la moyenne de 5 épreuves.

Avant de passer à la considération des essais non destructifs, il convient de discuter la signification des résultats des essais de traction et de flexion. On emploie les valeurs de résistance obtenues par l'essai de traction directement avec un coefficient de

sécurité. En général on prend ce coefficient d'une façon arbitraire, en se basant sur la pratique. La considération des différents coefficients de sécurité employés dans plusieurs genres d'application indique qu'ils sont vraiment une fonction de la ductilité et de la résilience. Si on considère que cette ductilité et cette résilience peuvent être, en général, remplacées par l'allongement à la flexion, on sera amené à établir une relation entre la ductilité de flexion et le coefficient de sécurité. Or, d'après la résistance à la traction et la ductilité à la flexion, on pourrait déterminer le taux de fatigue pratique à adopter pour un projet de charpente ou d'organe de machine.

TABLEAU V

*Taux de travail en fonction de la résistance à la traction
et de l'allongement à la flexion de l'acier*

pour des récipients clos, soudés d'après la formule
$$\tau = \frac{R}{7,15} \sqrt[3]{\frac{a}{10}}$$

Pourcent d'allonge- ment	Résistance en kg. mm ²						Coefficient de sécurité
	30	35	40	45	50	55	
5	3.35	3.9	4.45	5	5.57	6.11	9
7 ½	3.85	4.48	5.12	5.77	6.40	7.05	7.8
10	4.2	4.9	5.1	6.3	7.0	7.6	7.15
12 ½	4.5	5.28	6.01	6.77	7.52	8.26	6.65
15	4.8	5.6	6.4	7.2	8.0	8.8	6.25
17 ½	5.08	5.93	6.78	7.62	8.48	9.32	5.9
20	5.25	6.12	7.01	7.88	8.75	9.63	5.7
22 ½	5.45	6.46	7.27	8.18	9.10	10.00	5.5
25	5.65	6.60	7.55	8.5	9.43	10.37	5.3

On ne peut pas le faire tout théoriquement, mais en étudiant des résultats obtenus en service on peut arriver à une évaluation des facteurs qui est empirique, et en même temps logique. Cette étude indique que le facteur de sûreté est une fonction de la racine cubique de l'allongement à la flexion. Soit, par exemple, un coef-

ficient de sécurité de 7,15 et un allongement de flexion de 10 %. Le tableau V donnera le taux de travail d'après la formule indiquée. Il faut remarquer que ceci est une question de jugement et d'expérience et que le passé a prouvé la bonne applicabilité des chiffres de ce tableau. Depuis que cette étude a été introduite par l'auteur, les commissions régulatrices des Etats-Unis l'ont prise en considération attentive et il est intéressant de noter que les taux de travail permis par le A. S. M. E. pour les vases clos soudés travaillant sous pression ont été pris dans ce tableau.

LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS

Le premier essai non destructif dont on parlera est malheureusement limité aux récipients clos ou à des formes qu'on peut facilement convertir en de tels récipients. Cet essai est l'épreuve hydraulique; elle consiste essentiellement dans l'application d'une pression interne. On produit ainsi des déformations dans les diverses parties du corps creux et on les détermine exactement au moyen d'un extensomètre; on en déduira les efforts par millimètre carré si on est resté dans la limite des déformations élastiques. L'épreuve paraît bien convenable au point de vue logique, mais malheureusement il y a beaucoup de cas où des récipients ont donné une épreuve satisfaisante à l'essai hydraulique, mais après cela il se sont rompus en service. Il est possible que ces ruptures aient été causées par des conditions autres que celles prévues lors de l'étude du récipient, ou par quelque concours de circonstances extraordinaires. Mais en tout cas, cela indique qu'il y a des endroits trop faibles, soit dans les dimensions prévues au dessin, soit du fait de la construction. Un cas bien connu et déjà longuement discuté est celui de la tête courbée d'un récipient; beaucoup d'entre elles se sont rompues sans raison connue. Ce fut seulement avec l'introduction des têtes de chaudières elliptiques et par l'analyse toute récente des tensions en chaque point, que la grande faiblesse de la tête courbée a pu être comprise; et cependant, des milliers de récipients avec des têtes de ce genre avaient été soumis à l'essai hydrostatique! Quand on essaie des vases soudés à l'essai hydrostatique on peut apprendre beaucoup en plaçant des ex-

tensomètres à travers les soudures et en plusieurs points. Mais l'expérience montre que des défauts qui peuvent être dangereux à cause de leur position particulière ne causent pas d'augmentation appréciable de l'allongement élastique et alors on ne peut pas les détecter de cette façon. Ainsi on ne peut considérer l'essai hydrostatique que comme une épreuve bien grossière pour détecter de grands défauts et un travail de soudage absolument défectueux.

L'auteur a beaucoup étudié ces questions et a développé l'emploi de l'essai des soudures au stéthoscope. Dans cet essai on frappe sur la soudure avec un marteau et on écoute les sons produits au moyen d'un stéthoscope ordinaire de médecin avec un chapeau plat de caoutchouc sur le cône (fig. 21). Les très petites soufflures ne se détectent pas facilement par cette méthode, mais des soufflures de un millimètre de diamètre causent déjà un amortissement rapide des sons et un abaissement du ton produit quand le marteau frappe la soudure. Mais de tels trous ne sont pas en général d'une sérieuse importance dans les soudures. Au contraire, s'il n'y a pas de fusion au contact du métal d'apport et des tôles, ou bien s'il y a des reprises et interruptions dans le métal déposé, ce seront des défauts bien graves. Ces défauts sont facilement décelés par la méthode stéthoscopique; à cause de l'harmonique produit tout de suite après qu'on a frappé la soudure, le ton fondamental s'amortit rapidement, mais les tons de haute fréquence produits par une faute de fusion se distinguent facilement. On croit que ces tons sont produits par les vibrations des deux surfaces toutes proches comme le ferait un petit diapason. L'intérêt de cette méthode d'essai a été rigoureusement établi. En plusieurs circonstances où il y avait des indications stéthoscopiques de défaut dans les soudures de vases clos, on a essayé ceux-ci jusqu'à la rupture; or, la cassure résultante a donné une correspondance parfaite avec les indications du stéthoscope. Plus de 20 de ces vases ont été éprouvés au stéthoscope et alors resoumis à l'épreuve aux rayons gamma; il y a eu conformité complète des renseignements. Dans des constructions de bâtiments en acier on a éprouvé les soudures électriques au stéthoscope. Plusieurs défauts ont été notés et le métal d'apport à cet endroit fut fondu au chalumeau avec précau-

tion. On constata bien que des défauts se montraient dans chaque cas. On a également employé le stéthoscope pour se rendre compte de l'état de chaudières rivées en vue de détecter des cri-



Fig. 21

Application de l'essai au stéthoscope.

ques produites par la fragilité *hydroxique*, et dans un cas au moins on a trouvé une telle crique sous une rivure à couvre-joint alors il n'y avait aucune autre indication de son existence.

Naturellement, il est nécessaire d'avoir à sa disposition des ouvriers expérimentés pour ce travail, c'est la principale objection à cette méthode d'essai, mais on a constaté qu'on peut facilement former une personne ayant un sens normal d'auscultation. Pour éliminer l'emploi de l'oreille on a essayé (et ces études sont en voie de progrès) d'enregistrer les sons produits à l'aide d'analyseurs de sons, de façon que leurs particularités et défauts inscrits d'une façon permanente puissent être commodément étudiés. Certains appareils se sont montrés assez précis dans quelques cas, mais il y a encore beaucoup à faire pour rendre leur fonctionnement tout à fait satisfaisant. L'auteur signale cela seulement en passant et comme ayant un développement possible dans l'avenir.

LES ESSAIS AUX RAYONS X

Cette méthode d'essai est sans doute l'étude la plus satisfaisante parmi tous les essais non-destructifs et susceptibles d'un enregistrement qu'on peut appliquer aux joints soudés. Avec 100.000 volts on peut pénétrer 25 mm. d'épaisseur d'acier dans une heure, à distance convenable (250 mm). Et avec les plus grandes machines et avec un voltage plus haut, le temps d'exposition nécessaire est réduit d'une façon logarithmique. Il est pratique aujourd'hui de faire des essais aux rayons X sur de l'acier jusqu'à 60 mm. d'épaisseur. Mais l'interprétation des films obtenus par cette exposition aux rayons X est une chose bien difficile et ne saurait être faite que par des experts. Une différence de 2 % dans l'épaisseur du métal, c'est-à-dire un défaut d'épaisseur égal ou supérieur à 2 % de l'épaisseur de la tôle, donne une différence de densité du film qu'on peut bien percevoir à l'œil nu. Mais quand il y a un renforcement sur la soudeure, l'irrégularité de ce renforcement pouvant atteindre 10 % de l'épaisseur totale, cela masquera facilement les petits défauts. De plus, si l'on considère la présence d'une critique ou d'une zone non fondue, il faut songer que les épaisseurs correspon-

dantes seront en général moindres que 0,10 mm. et que la crique ne se présentera que rarement dans la direction des rayons X. Ainsi il y a diverses difficultés. Pour les éliminer, l'auteur a imaginé et employé la méthode d'examen aux rayons X montrée dans la figure 22: les rayons passent parallèlement au chauffe-

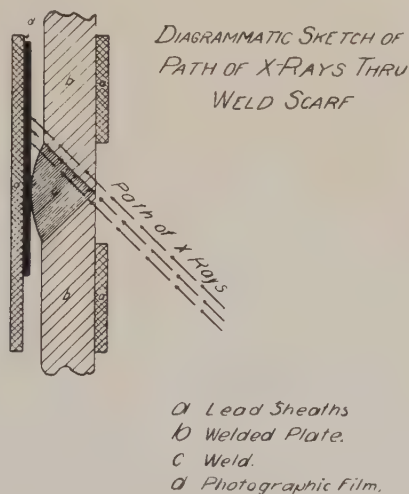


Fig. 22

Méthode d'application des Rayons X.

- a. Plaques de plomb.
- b. Tôle soudée.
- c. Soudure.
- d. Film photographique.

de la tôle avant la soudure et s'il y a une faute de fusion la zone ou crique étant directement dans la direction des rayons X, cette crique se trouve bien accentuée sur le film.

L'interprétation du film obtenu est délicate; un défaut de soudure cause une différence d'intensité (ombre), mais pas toujours; d'autre part, le film lui-même peut avoir des défauts produisant également des ombres. Ainsi, il est arrivé à l'auteur

et à d'autres expérimentateurs, de refuser une soudure alors que l'ombre constatée était dûe au film lui-même.

Pour bien distinguer l'origine des ombres, l'auteur opère toujours maintenant avec deux films dos à dos.

L'ESSAI AUX RAYONS GAMMA

Cet essai rentre dans la même catégorie que l'essai aux rayons X, et tout ce qu'on a dit de l'essai aux rayons X s'applique à l'essai aux rayons gamma. Cet essai est bien plus récent et on ne connaît pas encore bien la précision qu'il pourra donner. Il y a des investigateurs qui disent qu'un défaut de 2 % de l'épaisseur de l'acier est enregistré sur le film; mais d'autres investigateurs n'ont pas trouvé la même chose. Il y a quand même beaucoup de cas de la pratique où l'emploi des rayons gamma. est la seule façon de se rendre bien compte des soudures. Par exemple, l'auteur a eu l'occasion de faire des essais non-destructifs sur un grand nombre de vases sphériques d'à peu près 2 mètres de diamètre, en tôle d'acier de 25 mm. d'épaisseur emboutie, après quoi, on soude les deux hémisphères. Les vases étaient tout-à-fait fermés sauf les petites ouvertures pour les connexions de tuyaux. Les essais aux rayons X seraient tout à fait impraticables pour ces récipients parce qu'il faudrait des expositions d'une durée extrêmement longue et le passage des rayons se ferait par les deux parois diamétralement opposées. Au contraire, c'est une chose assez simple de mettre un petit tube contenant une certaine quantité d'émanation de radium dans la connexion d'un des tuyaux et de le tenir au centre de la sphère. J'ai alors couvert la soudure avec deux films, dos à dos et j'y ai ajouté une mince plaque de plomb, pour intensifier, ainsi que deux plaques couvertes de fluorure de zinc, j'ai assemblé les films de plomb et les plaques de fluorure de zinc dans une chambre noire et enveloppé le tout de papier noir et ai monté cet ensemble sur la sphère.



Fig 23

Disposition des films pour l'essai aux Rayons Gamma.

TABLEAU VI

Quantité de radium en milligrammes et quantité initiale en millicuries de l'émanation de radium pour donner l'intensité de film convenable en 15 heures d'exposition avec les films doubles dits (Xray à grande vitesse).

Epaisseur de l'acier mm.	DISTANCE DU RADIUM AU FILM (cm.)							
	30		45		60		75	
	Ra	Em	Ra	Em	Ra	Em	Ra	Em
25	5.3	5.6	12.0	12.7	21.3	22.5	33.3	35.2
50	12.6	13.3	28.3	29.9	50.3	53.1	78.6	83.0
75	29.3	31.0	66.0	69.7	117.3	123.8	183.3	193.6
100	63.0	66.6	141.6	149.6	251.6	265.8	393.1	415.3
125	132.5	140.0	298.2	315.0	530.0	560.0	828.1	875.0
150	206.5	313	666.6	704	1185	1252	1852	1956

L'arrangement est indiqué dans la figure 23. Une exposition de 12 heures fut suffisante en se servant de 78 millicuries d'émanation de radium. Les résultats montrèrent qu'il n'y avait pas de défauts sérieux. En outre, en étudiant lors de l'usinage les petits défauts qu'on a trouvé aux rayons gamma, on a vu que les défauts représentaient à peu près 4 % de l'épaisseur; or, le film fait aux rayons gamma nous a donné une bonne image de ce fait. Le tableau VI montre la relation entre l'épaisseur du métal et les millicuries nécessaires pour obtenir la densité du film désirée pour une longueur d'exposition donnée. On ne reproduira aucun des films faits en rayons X ou en rayons gamma parce que en faisant les reproductions on perd malheureusement tous les détails des ombres.

L'ESSAI DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

Les épreuves non-destructives au moyen de la résistance électrique ont été longuement étudiées par l'auteur, ainsi que par d'autres expérimentateurs. Quand on a des formes géométriques simples de barreaux soudés et dont le renforcement a été enlevé,

la méthode peut être intéressante pourvu que la quantité de silicium de l'acier d'apport soit négligeable ou connue. Quand on considère des formes plus compliquées comme des tôles, des cornières, etc... les variations de la densité du courant électrique sont telles qu'il est impossible d'obtenir des résultats satisfaisants. Ainsi ne se sert-on pas de cette méthode, ni dans l'industrie ni au laboratoire.

LES ESSAIS MAGNÉTIQUES

Les essais magnétiques semblent posséder de grandes possibilités d'utilisation ; on peut produire les lignes magnétiques dans le métal de la soudure, soit en employant le champ d'un électro-aimant à travers la soudure, soit en faisant passer des courants électriques parallèlement à la soudure et ainsi produisant un champ magnétique à travers celle-ci (voir fig. 24). Le flux à l'air en dehors de la soudure est une indication des défauts, et on peut mesurer ce flux, soit par des bobines d'induction avec amplification du courant par lampe de radio, soit par des instruments de mesure directe du type magnétomètre ou même au moyen de limaille de fer placée sur un morceau de papier au-dessus de la soudure. L'auteur a beaucoup étudié ces méthodes et il est vraiment possible qu'on puisse les développer dans l'avenir au point de pouvoir les appliquer avec succès. Mais actuellement, même quand le renforcement de la soudure est enlevé, les appareils ne sont pas assez délicats pour déceler le genre de défauts auquel on est intéressé ici ; seuls les gros défauts pourront être découverts avec précision. Par exemple, l'auteur a étudié une soudure dans laquelle on a laissé intentionnellement une zone non fondue au fond du V. La soudure était faite dans une tôle de 12-1/2 mm. d'épaisseur ; le renforcement fut enlevé par usinage. On a fait alors passer un courant électrique parallèlement à la direction de la soudure ; la tôle soudée était horizontale, le fond du V de la soudure placé en-dessous ; on pose une feuille de papier sur la tôle et on y répand de la limaille de fer. On constate que la limaille forme un dessin géométrique régulier

La même chose s'observe en employant un électro-aimant ; évidemment le diagramme était différent, mais régulier. Mais quand on tourne la soudure avec le fond du V en haut, le papier restant directement sur le fond du V, on distingue les défauts

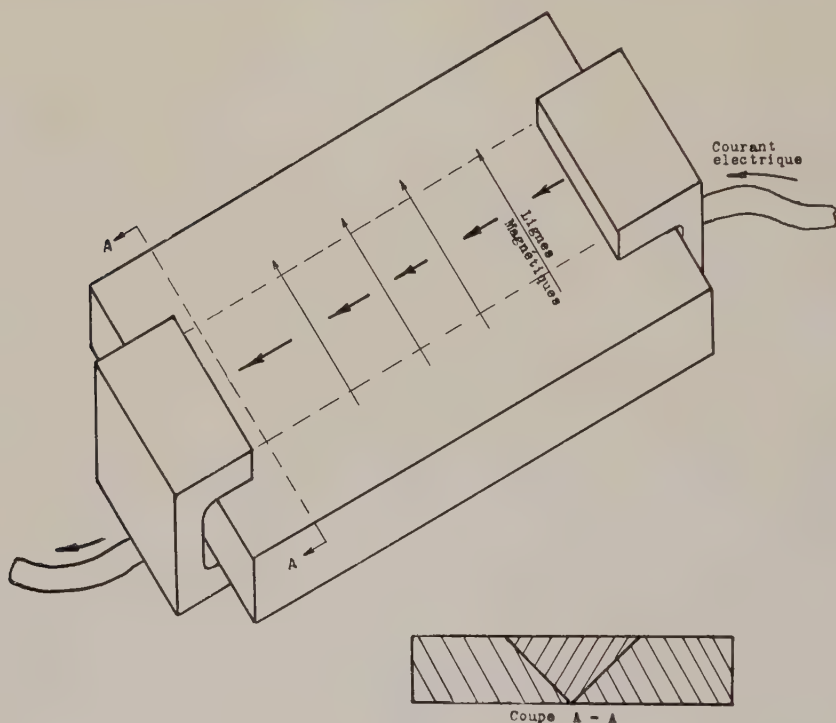


Fig. 24

Essai magnétique des soudures

immédiatement. Cela montre qu'un défaut existant dans la soudure à une distance appréciable de la surface ne serait pas nécessairement reconnu par cette méthode. L'auteur a étudié des essais analogues faits avec des instruments tels que magnétomètre et bobines d'induction avec amplification de radio, et les résultats étaient semblables. Ainsi, pour l'instant, ces méthodes ne sont pas assez sensibles pour nos besoins.

Un autre type d'essai magnétique, dit analyse magnétique, a

été appliqué à la soudure mais sans succès. Il est basé sur le principe suivant: envoyons un courant alternatif sinusoïdal dans une bobine primaire, à l'intérieur de laquelle nous plaçons, comme noyau, un barreau découpé dans le métal même d'apport. Dans une bobine secondaire placée tout autour, il se produira des courants alternatifs, mais qui seront déformés si le noyau (acier d'apport) n'est pas homogène.

Cette méthode donne des résultats assez satisfaisants quand on la pratique ainsi.

Mais prenons comme noyau un barreau d'acier doux homogène et mettons-le en aussi bon contact que possible avec le métal d'apport d'une soudure: les essais montrent qu'on n'a plus alors de bons résultats.

Dans l'industrie il n'est presque jamais possible d'entourer la soudure avec les bobines de mesure, aussi cette méthode demandera-t-elle encore beaucoup de perfectionnements avant qu'on puisse l'appliquer au problème qui nous intéresse ici.

EFFET DE LA CHALEUR DE SOUDAGE PRODUITE DANS LES TOLES D'ACIER SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES TOLES

On sait depuis longtemps que la structure et les propriétés mécaniques de l'acier adjacent à une soudure sont fortement influencées. On a beaucoup débattu la question de savoir si ces changements sont des dégénérations ou des améliorations au point de vue des propriétés mécaniques et quelle est leur importance. Dans l'étude ci-après l'auteur a étudié cette question en faisant des mesures quantitatives des propriétés mécaniques et donnant des micrographies de la structure et il montrera que l'effet général du soudage sur l'acier n'est pas dangereux ou même gênant dans les applications à la construction et que si les valeurs de certaines des propriétés mécaniques sont abaissées, d'autres sont améliorées. L'auteur a imaginé des méthodes capables d'améliorer les caractéristiques abaissées au moyen de recuits spéciaux et il a

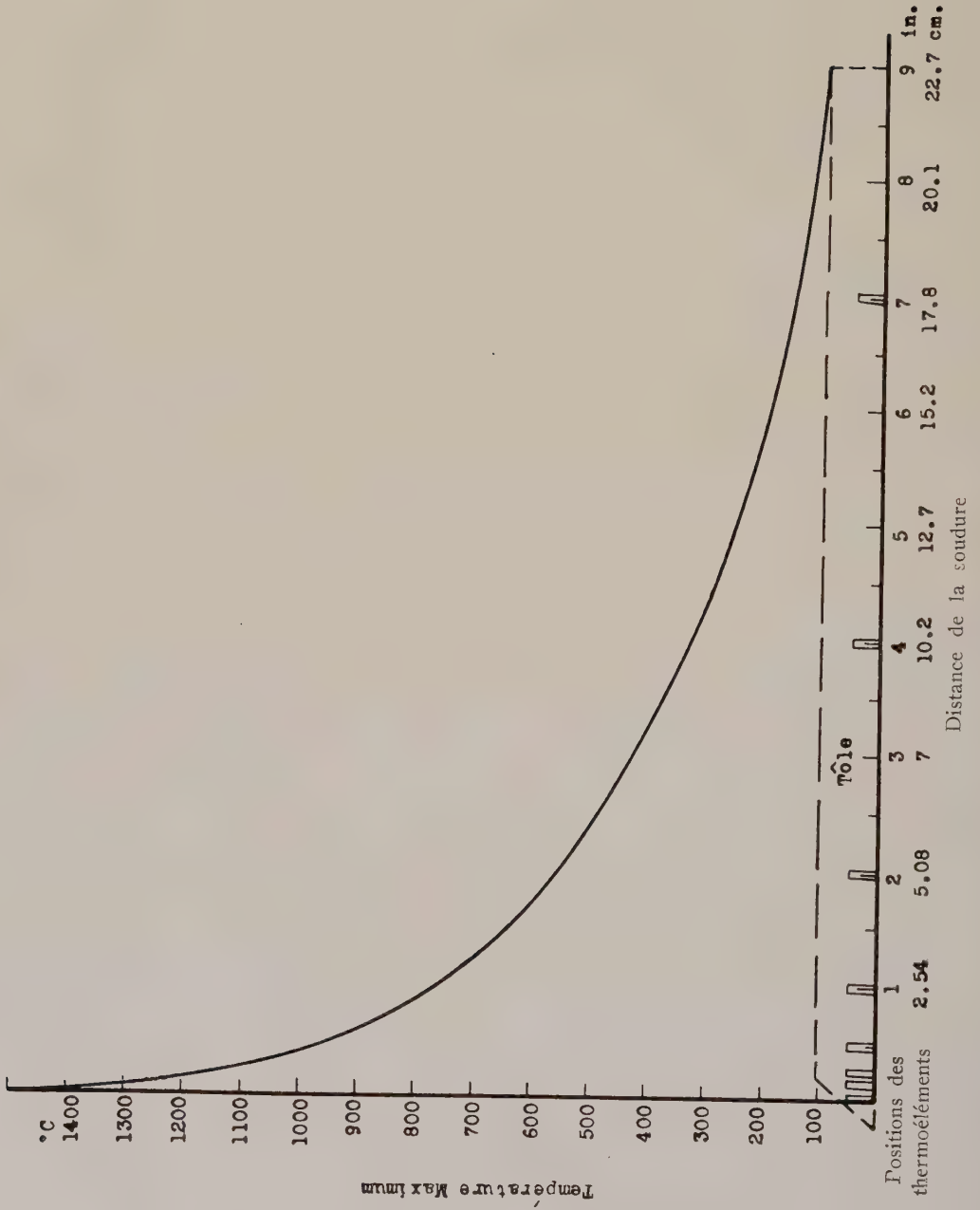
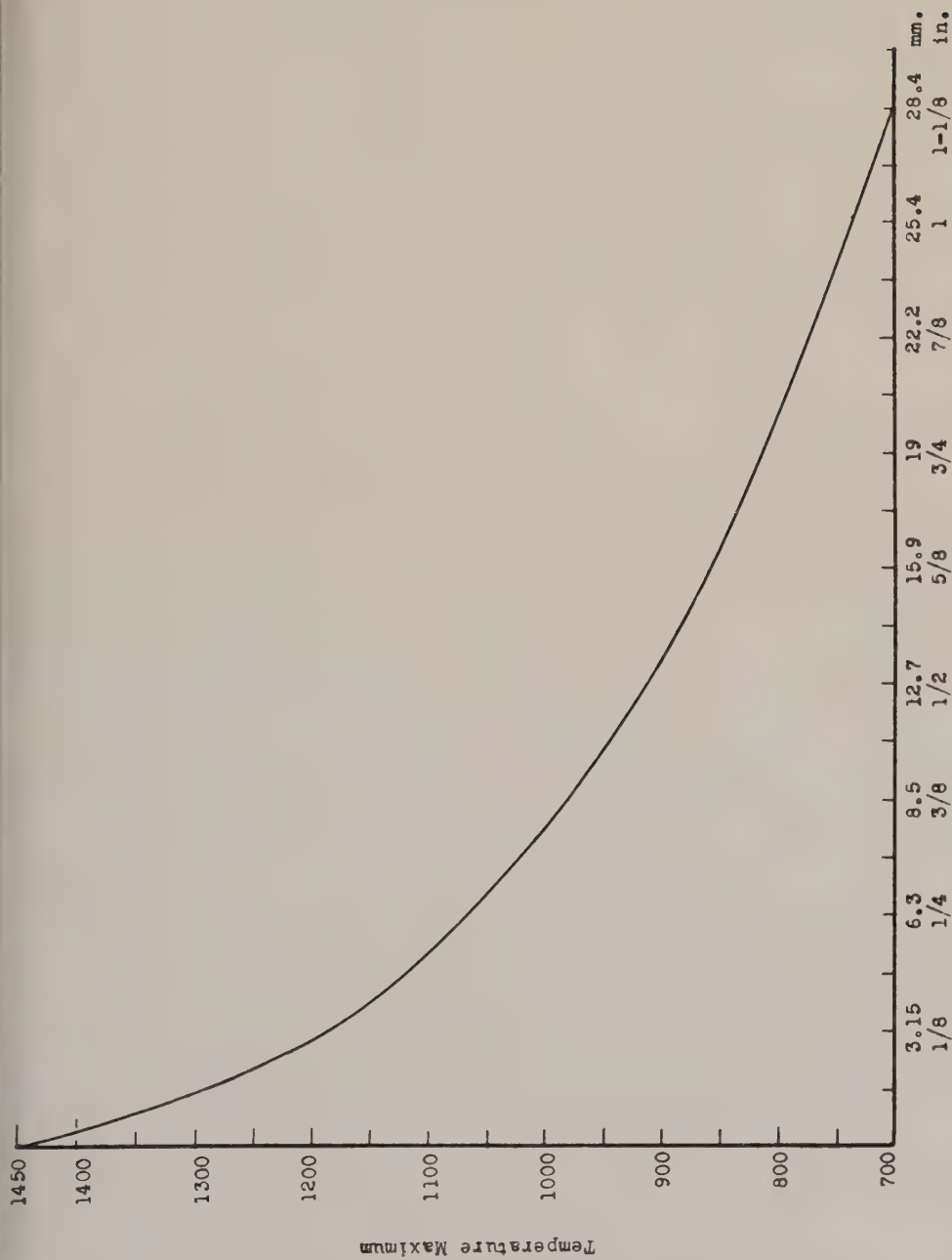


Fig 25



Distance de la soudure

Fig. 26

Température atteinte dans les tôles pendant le soudage

démontré que la soudure ne produit pas le phénomène de la fragilité de vieillissement.

SECTION PREMIÈRE. — Effet des températures au-dessus de 600° C.

Pour étudier cette question l'auteur a fait faire une soudure par un soudeur très expérimenté entre deux pièces de tôle d'une épaisseur de 12,5 mm. (1/2") et d'une longueur de 92 cm. (36 in.). Les tôles avaient 23 cm. de largeur (9 in) chacune. Elles avaient été choisies en acier de la meilleure qualité et la composition était 0,24 % de carbone 0,41 % de manganèse, traces de silicium, 0,020 % de phosphore et 0,037 % de soufre. Chacune des tôles était chanfreinée à 45° suivant la longueur (92 cm.) de sorte que la soudure était comprise dans un angle droit. Plusieurs couples thermo-électriques en fil de platine et de platine rhodié étaient fixés suivant une ligne droite par rapport à la ligne de la soudure et à la même distance des deux bouts de la soudure. Dans chaque cas on a percé un petit trou de 1,52 mm. (1/16 in.) de diamètre dans les tôles, le trou pénétrant la moitié de l'épaisseur de tôle. Le couple était fixé dans le trou au moyen de magnésie en poudre et humide. La poudre était passée au tamis à 200 mailles, c'est-à-dire qu'elle doit passer à travers des trous carrés de 1/200 in (0,12 mm. de côté).

Au moyen d'un chronomètre à secondes, trois opérateurs faisaient simultanément les mesures des températures indiquées par les couples à mesure du soudage opéré par un soudeur professionnel. Tout était fait avec une grande précision au point de vue d'une vitesse normale et régulière du soudage.

Les résultats sont indiqués par les courbes, fig. 25 à 28, ainsi que les endroits où étaient placés les couples. Les courbes montrent la température maximum indiquée par chaque couple, c'est-à-dire la température maximum en fonction de la distance normale à la ligne de la soudure, en mesurant du côté du chanfrein. La courbe montre l'ascension normale puis la baisse normale de la température en fonction du temps mesuré par le couple n° 2, et d'après cette courbe on voit la vitesse de soudage d'après l'échelle des temps. La différence de 2-1/2 minutes à la ligne des couples dans la courbe montrant la vitesse du soudage et le temps désigné

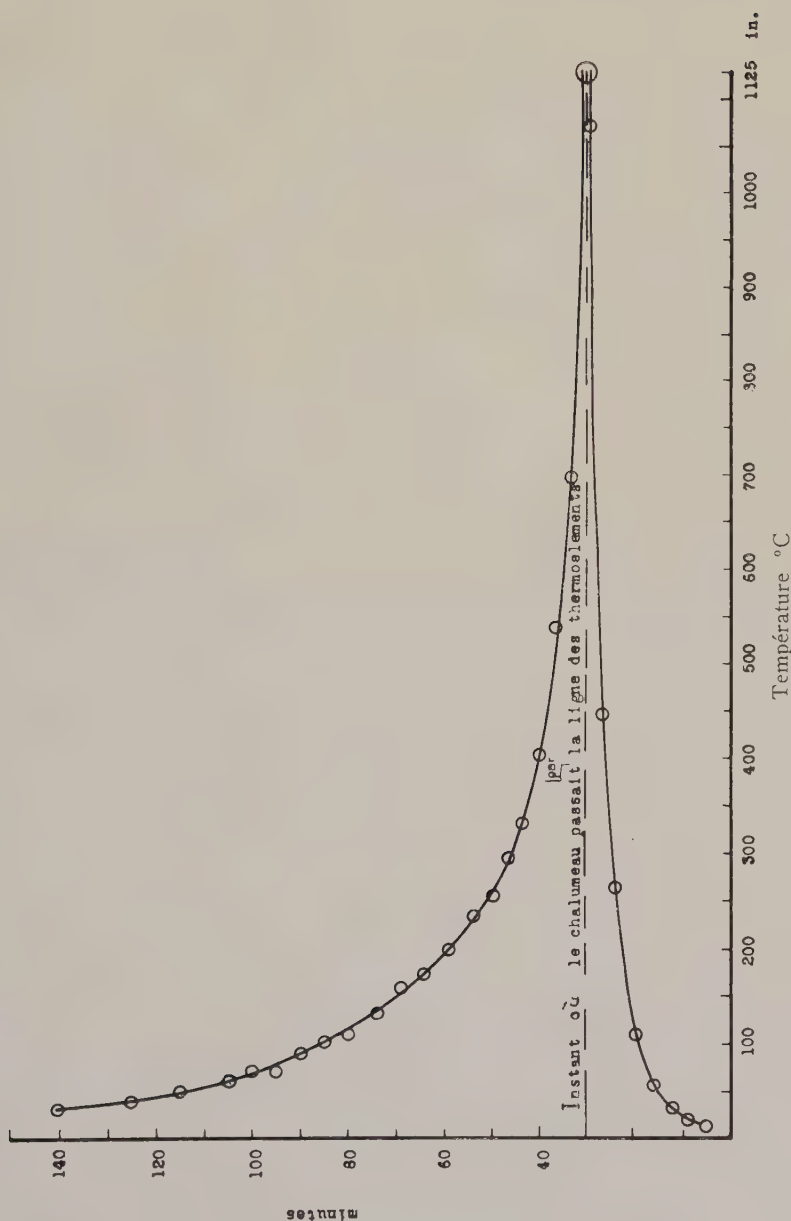


Fig. 27
Courbe temps-température, position N° 2.

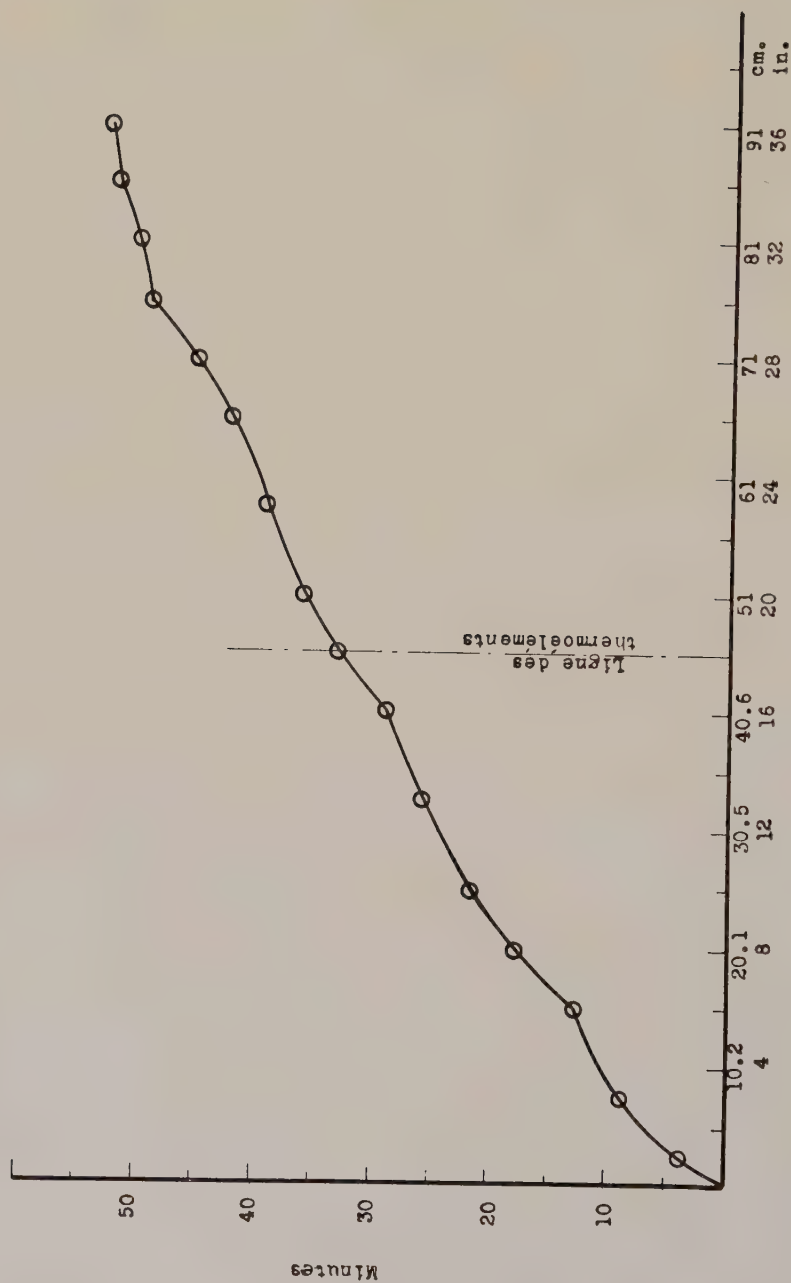


Fig. 28

Vitesse de soudage des tôles de l'expérience.

28.6 mm
 $\frac{1\frac{1}{8}''}{700^\circ}$

63-52
44.3 Kg/mm²

70-40
49.2 Kg/mm²

Fig. 29

comme celui de température maximum dans la courbe de température est due à ce que le chauffage du chanfrein se produit en avance sur le dépôt du métal du barreau d'apport.

La micrographie en série continue (fig. 29) est faite suivant la section en ligne à angle droit par rapport à la ligne de soudure

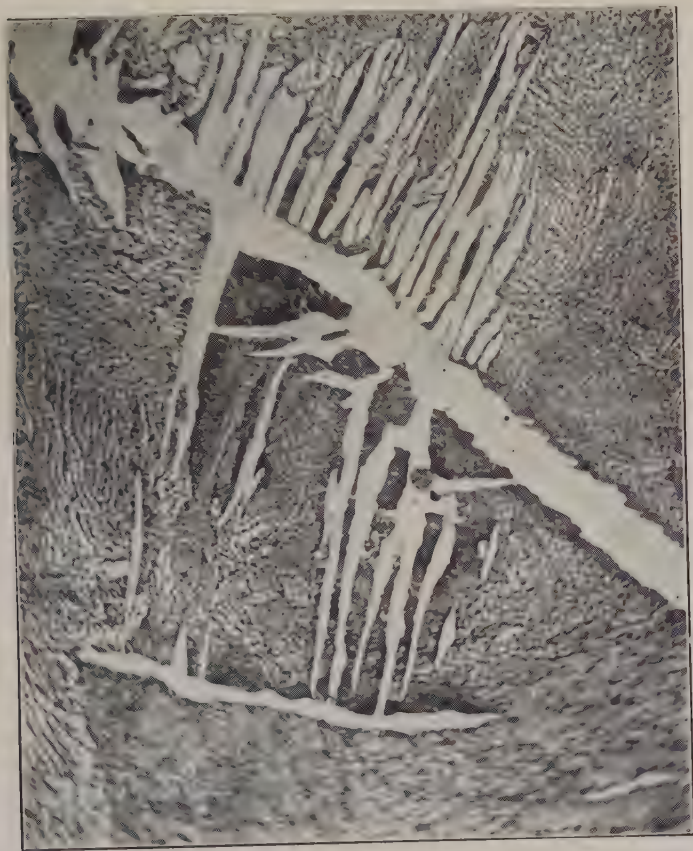


Fig. 30

Microstructure des éprouvettes traitées au four à gaz
1400° C. $\times$ 500

et elle montre l'effet de la chaleur du soudage sur la microstructure de la tôle en avançant du chanfrein jusqu'à la zone de recuit

et à la zone qui n'a pas été changée du tout par cette chaleur. On voit tout de suite que la chaleur de soudage a complètement changé la microstructure. De plus, les sections de tôles adjacentes



Fig. 30 bis

Microstructure des éprouvettes traitées au four à gaz
1350° C. $\times$ 100

à la soudure et ainsi chargées se trouvent divisées en plusieurs zones d'après la micrographie continue.

PREMIÈREMENT : *zone avoisinant le chanfrein*; le métal de cette zone a atteint une température très élevée mais pendant très peu

de temps. Cette température a produit une structure très grossière avec des grains perlito-sorbitiques dans un réseau de ferrite.

SECONDEMENT: zone juste adjacente à la dernière, à peu près à



Fig. 30 ter

Microstructure des éprouvettes traitées au four à gaz

1300° C. x 100

3 mm. du chanfrein; on voit alors un grossissement des grains, mais pas aussi fort que dans la première zone et on ne voit pas le réseau de ferrite, bien que la ferrite soit la phase continue.

TROISIÈMEMENT: zone qui est comprise entre les limites des températures des transformations allotropiques. Ici le grain est fin

et on trouve que la ségrégation linéaire du carbone est accentuée. Il faut remarquer la forme typique angulaire de la perlite dans cette zone. QUATRIÈMEMENT: *zone de recuit*. Cette zone a été



Fig. 31

Microstructure X 100 des éprouvettes traitées au four à gaz
1200° C.

maintenue à une température juste au-dessous de la température de transformation et le métal a été adouci par suite d'un commencement de coalescence de la cémentite.

Pour déterminer les propriétés mécaniques des différentes zo-

nes affectées par la chaleur, j'ai préparé des échantillons coupés dans la même tôle que celle soumise au soudage, en les chauffant au four à gaz à des températures allant de 600° C. jusqu'à 1.400



Fig. 31 *bis*

Microstructure X 100 des éprouvettes traitées au four à gaz
1100° C.

C. en tenant l'atmosphère gazeuses du four très légèrement carburante ou neutre. La température du four étant fixée, les échantillons sont restés dans le four seulement le temps qu'il était nécessaire pour qu'ils soient chauffés à la température jusqu'au

centre. Après cela on enlève les échantillons du four et on les agite à l'air jusqu'à ce qu'ils soient refroidis à 500° C. (*disparition du rouge*). Après cela ils étaient laissés à l'air calme. L'auteur



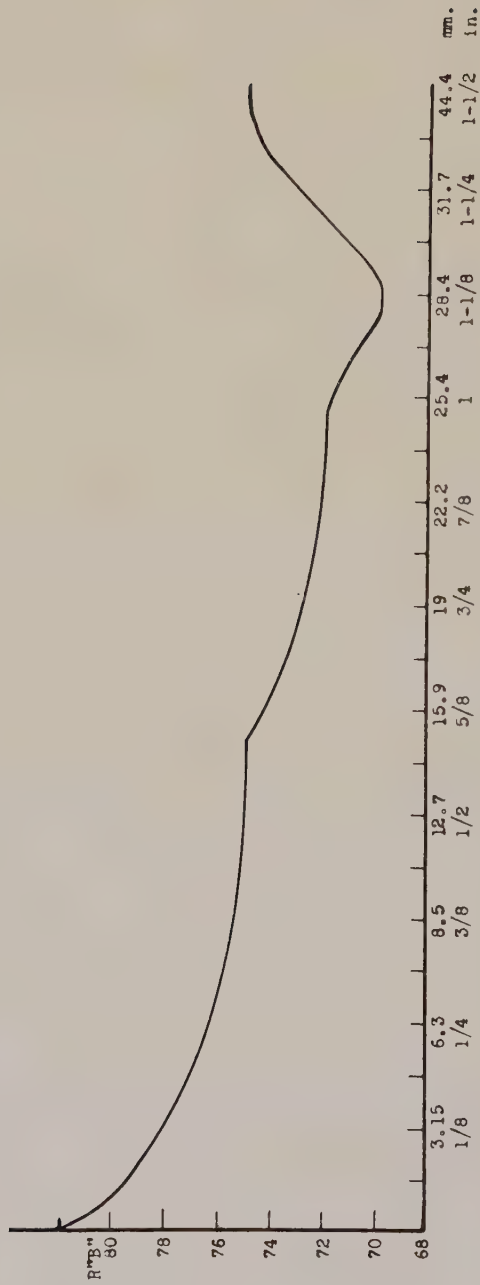
Fig. 31 *ter*

Microstructure X 100 des éprouvettes traitées au four à gaz
1000 C.

apprit par des expériences faites il y a quelques années que ce mode de refroidissement donnait une vitesse d'abaissement de température qui est à peu près la même que celle qui se produit sur les tôles pendant le soudage. Les microstructures de ces di-

vers échantillons ont été étudiés et l'auteur a également usiné des éprouvettes pour des essais de traction. Les micrographies ci-jointes (fig. 30 et 31), montrent bien l'accord extraordinaire entre les structures dans ces échantillons synthétiques et celle des zones adjacentes à la soudure reproduites dans la micrographie continue précédemment expliquée. De plus, j'ai fait des mesures de dureté à la machine Rockwell sur la section traversée par la soudure, fig 32, et les mesures correspondantes étaient faites sur les échantillons traités à part. Pour avoir encore plus d'indications sur l'identité des échantillons traités comme déjà décrit et les zones dans les tôles soudées, j'ai coupé des tranches de 2,5 mm (1/10") d'épaisseur des tôles tout à côté de la soudure et en ligne parallèle à la soudure comme indiqué dans le croquis ci-joint. (fig. 33). Ces tranches ont été soumises à des esasis de flexion et les résultats ont été comparés à ceux obtenus sur les échantillons synthétiques déjà décrits.

Quand j'ai fait le traitement spécial des échantillons synthétiques pour faire l'étude des propriétés mécaniques, j'ai songé à l'effet de l'atmosphère ambiante pendant le chauffage et, comme déjà décrit, cette atmosphère était maintenue légèrement carburante. Pour voir si la différence entre cette atmosphère et l'atmosphère de la flamme oxyacétylénique dite « neutre » exerçait une différence dans les valeurs de résilience sans faire cependant de différences dans les autres propriétés mécaniques, j'ai fait les expériences suivantes: des échantillons d'un centimètre carré et d'une longueur convenable étaient chauffés en position verticale au moyen d'un grand chalumeau oxyacétylénique bien mis au point dit « neutre ». La température était mesurée au moyen d'un pyromètre optique. Le chauffage était fait par un technicien expérimenté dans les manipulations des chalumeaux et les températures étaient suffisamment uniformes d'un bout à l'autre de l'échantillon. Le refroidissement de ces échantillons a été réglé en les agitant lentement dans l'air calme. Ensuite on a comparé les microstructures des échantillons avec celles des échantillons chauffés au four et celles des zones dans les tôles soudées. Dans les expériences, en chauffant au moyen du chalumeau, le réglage de



Distance de soudure

Fig. 32

Durete Rockwell en fonction de la distance à la soudure

la température absolue était bien difficile. L'emploi d'un pyromètre optique était le mieux qu'on puisse faire, mais les conditions étaient assez peu favorables pour cela. Malgré ces difficultés, les microstructures des échantillons traités au chalumeau

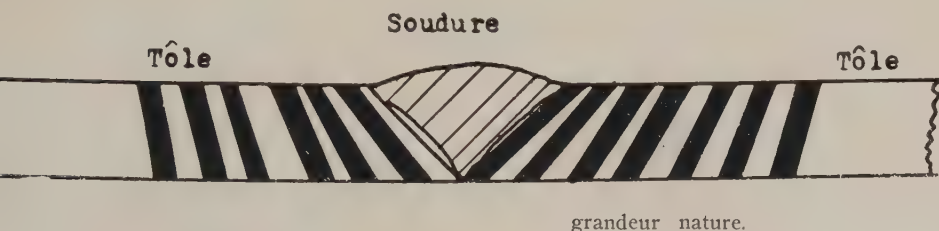


Fig. 33

Position des tranches des essais

étaient bien comme désirées. Dans deux cas les structures étaient identiques et dans tous les cas les valeurs Izod étaient les mêmes que celles des échantillons traités au four à gaz (fig. 34).

En préparant les échantillons synthétiques j'ai pu reproduire les températures de chauffage, les microstructures, les duretés, les allongements à la flexion et l'atmosphère de chauffage des zones particulières dans les tôles soudées. Il est donc logique d'admettre que les propriétés déterminées par les essais de traction et de résilience sont aussi les mêmes pour les échantillons préparés et pour ceux des zones correspondantes des tôles soudées. D'après cela on a donc attribué les valeurs obtenues avec les échantillons traités aux zones correspondantes des tôles soudées. Les valeurs sont reportées dans les tableaux ci-joints VII, VIII, IX, ainsi que sur la micrographie continue. La considération des propriétés mécaniques montre de suite que l'effet de la chaleur du soudage est importante seulement dans deux zones de chauffage, celle qui s'est trouvée à la température juste en-dessous de la température critique. Conformément à cela j'ai étudié spécialement la ductilité et la résilience de la première zone. Un morceau de la tranche dans laquelle cette zone était comprise a été soumis aux essais de flexion dans un appareil spécial construit pour qu'on puisse faire

le pliage sur la platine du microscope. L'essai était fait une fois les sections polies et attaquées, et j'ai pu suivre ainsi le mode de



Fig. 34

Microstructure X 100 des éprouvettes
traitées au chalumeau à 1150° C.

rupture sans difficulté. La cassure suivait très nettement les bords des grains et ce phénomène explique bien l'abaissement de la résilience de cette zone. Au point de vue de la construction, l'amélioration de la résistance de cette zone est très importante, parce

que, en service, sauf des cas extraordinaires, le matériel ne subira pas des efforts dépassant la limite élastique. Cela n'est plus



Fig. 34 bis

Microstructure X 100 des éprouvettes
traitées au chalumeau à 1350° C.

vrai pour les régions tout à fait adjacentes dont la limite élastique est nettement inférieure à celle de la zone à basse résilience.

Les propriétés mécaniques ainsi que la microstructure de ce

réseau au bord des grains constituent une forte indication que cette portion a suivi la transformation gamma-delta au chauffage,

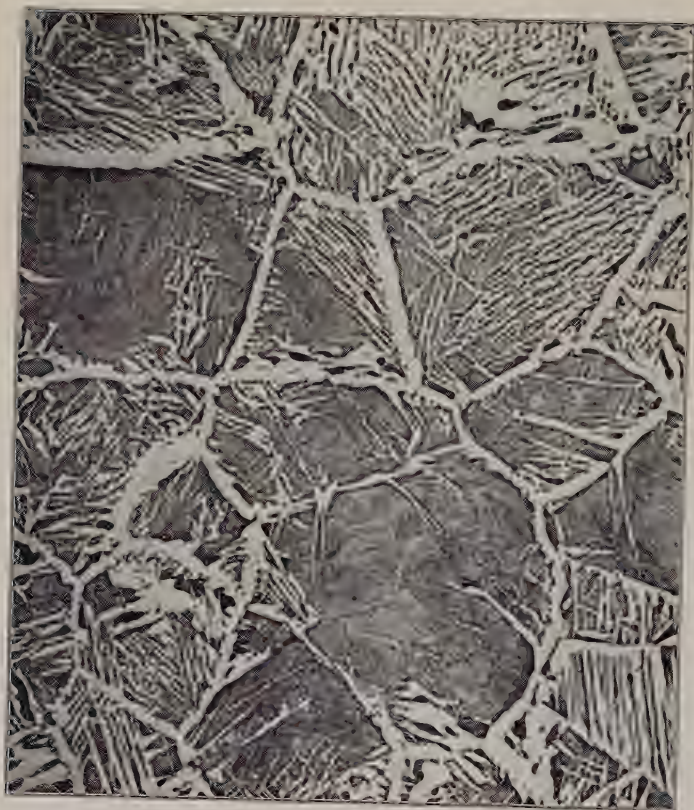


Fig 34 *ter*

Microstructure X 100 des éprouvettes
traitées au chalumeau à 1400° C.

mais lors du refroidissement est restée à l'état delta-alpha avec sursaturation de cémentite qui a été ensuite précipitée en particules inframicroscopiques

TABLEAU VII

Résultats obtenus sur les tranches coupées des tôles soudées

DISTANCE de la soudure mm.	TEMPÉRATURE maximum achevée C°	DURETÉ Rockwell B	POURCENT d'allongement par flexion
—	—	—	—
0.4	1400	82	10
0.8	1350	80	24
1.6	1300	79	à plat
3.2	1200	78	à plat
5.5	1100	76.5	à plat
13.5	900	75	à plat
20.5	800	72.5	à plat
28.5	700	70	à plat

TABLEAU VIII

Résultats obtenus sur des éprouvettes traitées au four à gaz

Température C°	Dureté Rockwell B	Allongement % à la flexion	Limite élastique Kg./mm ²	Résistance Kg./mm ²	Allongement (50 mm) %	Réduction %	Izod ft. lbs.
—	—	—	—	—	—	—	—
1400	82	11	32.8	57	14	16	8
1350	81	28	30.5	55.6	19	31	12
1300	79	à plat	28.4	52.8	26	49	22
1200	78	à plat	28.4	50	32	58	28
1100	76	à plat	28.4	48.5	35	54	28
900	74	à plat	28.4	49.2	35	56	28
800	74	à plat	30.5	52.0	27	52	26
700	70	à plat	25.6	44.3	38	62	52
Tôle initiale	75	à plat	29.5	49.2	29	52	40

TABLEAU IX

Résultats obtenus sur des éprouvettes traitées au chalumeau

Température C°	Dureté Rockwell B	Limite élastique Kg./mm.	Résistance Kg./mm ²	Allongement 50 mm.	Réduction %	Izod Ft. Lbs.
—	—	—	—	—	—	—
1350	82	30	56	20	36	14
1150	77	29.7	50	29	56	26

La chose importante dans tout ceci se trouve dans le fait que la zone à basse résilience est aussi la zone de plus grande résistance à la traction. Dans les appareils et charpentes soumis à des efforts statiques, il y a deux espèces de forces, les forces normales de tension et de compression et les forces engendrées par les moments de flexion. Il est évident que les sections à plus grande résistance ne seraient assujetties à s'allonger parce que les sections adjointes s'allongent sous une tension moins grande que la limite élastique de la zone plus forte, et les tensions en général n'atteindront pas la limite élastique de cette zone. On peut quand même imaginer des cas où, à cause de moments de flexion bien localisée, même les zones à résistance supérieure seront sujettes à s'allonger. Par exemple, cette condition se trouve dans la courbe d'une tête d'un vase soumis à une pression interne quand la courbure de la section cylindrique ou de la section sphérique est trop accentuée, c'est-à-dire quand les rayons de raccordement sont trop faibles. Mais on ne placerait jamais une soudure en un tel endroit. Il faut se rendre compte, en outre, que le moment de flexion devrait être très localisé parce que la zone à haute résistance et à base résilience est seulement d'une épaisseur de 0, 78 mm. Dans les charpentes et pièces de machines soumises à des efforts alternatifs inférieurs à la limite élastique, la zone à forte résistance reste meilleure qu'ailleurs malgré l'abaissement de sa résilience, parce qu'on a déjà constaté que la limite de fatigue est une fonction directe de la résistance et n'est pas du tout fonction de la ductilité; or, la zone dont on parle est meilleure au point de vue de la résistance que le reste de la tôle. C'est seulement dans des cas spéciaux, lorsque la région soudée est soumise à des chocs directs qu'il est possible que la zone moins ductile soit de qualité pratiquement inférieure au reste de la tôle; mais il faut bien dire qu'en général on ne place pas de soudures dans les endroits critiques où il risque de se produire des chocs directs. Ainsi, il est évident qu'en général l'existence de la zone de moindre résilience n'est pas dangereuse pratiquement, grâce à sa plus grande résistance.

Pour étudier l'effet du traitement à chaud une section d'une tôle soudée fut normalisée à 900° C. pendant 5 minutes, c'est-

à-dire chauffée à 900° C. maintenue à cette température pendant 5 minutes et refroidie à l'air calme. La section correspondant à la zone de grande résistance et à base résilience fut préparée et l'échantillon assujetti sur la monture du microscope pour faire un essai de flexion comme déjà décrit. Dans ce cas il fut impossible de casser le petit échantillon, j'ai pu en effet l'amener presque au pliage à bloc sans apparence de crique sur la surface. Il y avait beaucoup de lignes indiquant des plans de glissement dans les grains et la structure micrographique était tout à fait la même que celle marquée 900° C. sur la micrographie continue. En chauffant à une température inférieure à 900° C. on ne peut changer que peu la structure et l'allongement. Comme les tôles avec lesquelles j'ai fait ces expériences avaient une très basse teneur en silicium, j'ai fait les mêmes essais avec des tôles qui en contenaient 0,20 %. Les mêmes zones à basse résilience furent mises en évidence avec rupture entre les grains dans la flexion opérée sur la platine du microscope. Après normalisation à 900° C. la microstructure grossière était détruite et le pliage se fit sans crique. Dans la zone correspondant aux températures juste au-dessous de la température critique on trouve l'effet ordinaire du recuit. Cet effet comporte un abaissement de la résistance à la traction et une amélioration de la ductilité. Dans les tôles dont on parle, avec 0,24 % de carbone, la résistance a été abaissée de 5 kg. par millimètre carré. Plusieurs essais sur des tôles de 0,10 à 0,20 % de carbone ont montré que l'abaissement de résistance y était de 1,5 à 2 kg/mm². Ce phénomène n'est pas spécial à la soudure; on le connaît suffisamment bien en métallurgie pour qu'on puisse savoir ce qui se passera dans chaque cas, l'ordre d'abaissement de la résistance étant fonction de la teneur en carbone.

Il faut remarquer que cet abaissement de résistance est vraiment la même chose que la différence de résistance existant entre un acier laminé tel quel, et le même acier normalisé par un recuit convenable.

Ainsi, avec les aciers spéciaux ou les aciers à haute teneur en carbone, il faut tenir compte de ce que cet abaissement de résistance peut être assez sérieux si la soudure est placée dans une

charpente ou un organe de machine, dans une position telle que la zone dont on parle doive avoir la même résistance que le reste. Mais si on envisage des tôles ordinaires de chaudière ou pour autres applications semblables l'ordre d'abaissement en général, n'est généralement pas assez important pour qu'on ait à s'en préoccuper. En tout cas, si on rechauffe à 900° C. en refroidissant à l'air calme, cette zone est tout à fait évitée et la résistance est ramenée à sa valeur normale.

Conclusions I.

1. — Au point de vue de la plupart des applications pratiques, on peut conclure que le métal au voisinage d'une soudure n'est pas changé sérieusement par la chaleur du soudage.

2. — Le changement le plus important se produit tout près du métal d'apport. Dans cette zone la résilience est diminuée, la résistance augmentée de sorte qu'en général l'ensemble de ces deux particularités fait que l'acier reste très convenable pour les applications. On peut d'ailleurs rétablir tout-à-fait les propriétés initiales de cette zone par une normalisation.

3. — La résistance minimum se trouve dans la zone des températures subcritiques; la diminution de cette résistance est d'ailleurs peu importante dans les tôles en acier à faible teneur en carbone et par contre il y a un peu plus d'allongement. Dans cette zone également on peut rétablir les propriétés initiales en normalisant.

EFFETS DES TEMPERATURES JUSQU'À 600° C.

Il est bien connu que dans le cas des aciers à basse teneur en carbone, les températures au-dessous de 600° C. maintenue pendant des durées de temps modérées n'ont pas d'effet sur la microstructure ni sur les propriétés mécaniques, quand il s'agit d'aciers non trempés ni soumis à des tensions internes.

Il est bien évident qu'avec les tôles soudées à la façon ordinaire il n'y a pas de trempe importante; aussi le recuit aux températures inférieures à 600° C. n'a pas besoin d'être considéré.

Dans les tôles étudiées il n'y eut, en effet, aucun changement de la microstructure en-dessous de 600° C. et les mesures de dureté dans la tôle initiale et dans la zone marquée 550° C. ont donné des valeurs de Rockwell identiques à « B 75 ».

Mais si les tôles soudées ne sont que rarement trempées, par contre elles sont souvent soumises, du fait des variations de températures, à des tensions internes. Dans la construction des charpentes et pièces de machines soudées, par exemple les vases pour gaz sous pression, ces effets peuvent être considérables, et amener des déformations d'ensemble, par exemple une tôle de 25,4 mm. d'épaisseur se trouve cintrée en cylindre d'un diamètre de 50" (12 cm.); (voir fig. 35) il se produit un allongement de 2 % dans les fibres extérieures.

Il a été déjà démontré que dans certains aciers cet écrouissage est suivi d'un effet de vieillissement, tant à la température ordinaire qu'à une température voisine de 200° C., vieillissement qui peut produire une fragilité bien marquée. De plus on a parfois rencontré une sorte de fragilité dans les tôles soudées à une grande distance de la soudure. Mais comme le vieillissement peut se produire à la température ordinaire, le phénomène de vieillissement après écrouissage ne devrait pas être regardé à proprement parler comme un effet de la chaleur de soudage. Cependant ce vieillissement est probablement aggravé par la chaleur du soudage et comme on a également constaté parfois des criques causées par la chaleur de soudage, l'auteur a étudié la question pour éviter des erreurs de cette espèce dans l'avenir; malheureusement le phénomène est difficile à étudier parce que les propriétés mécaniques statiques sont peu affectées.

Des éprouvettes des tôles déjà décrites ont été soumises par l'auteur à la traction dans une machine à essai. En général j'ai allongé les éprouvettes de 3 % et après cela les ai vieilles à 150° C. pendant 24 heures. Plusieurs essais préliminaires ont montré que ces conditions étaient optima pour la production de la fragilité. La valeur de résilience Izod à une machine de 120 ft. lbs (16, kgm.) était de 37 à 44 (foot pounds » (5,1 à 6,1 kgm) avant le traitement [Il n'est pas possible de traduire les valeurs Izod en valeurs Charpy à cause des différences de

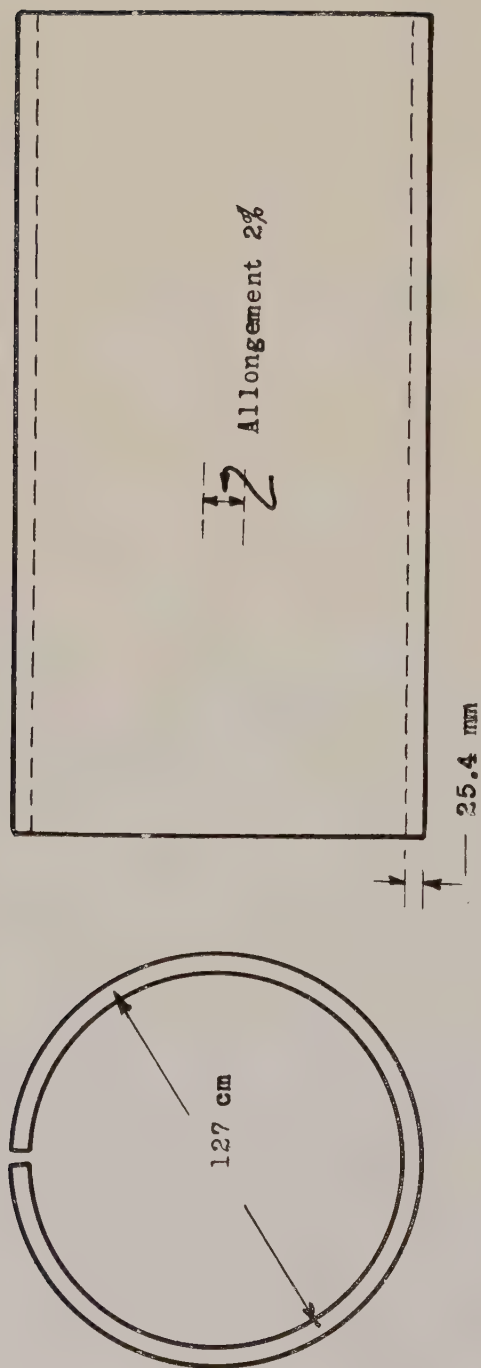


Fig. 35
Cylindre cintré

vitesses des pendules employés, même à supposer que l'énergie du marteau au moment de l'impact soit la même]. Ces valeurs de 37 à 44 ft. lbs (5,1 à 6,1 kgm.) furent ramenées jusqu'à 8 à 12 ft. lbs (1,1 à 1,6 kgm) par le traitement dit d'étirage et de vieillissement. On a également fait des expériences pour déterminer l'effet de l'allongement moindre ou plus grand que 3 %, et allant de 0,05 % jusqu'à 12 %. Après vieillissement la fragilité se produisait dans tous les cas où l'allongement était de 1,5 % au plus ; quand l'allongement était inférieur à 1,5 % on a rencontré quelquefois de la fragilité, mais pas toujours.

D'autre part, on a étudié l'effet de la température de vieillissement, on a trouvé qu'après un mois à la température ordinaire (20°) l'éprouvette, allongée de 3 %, était fragile ; à 100° C. la fragilité était produite dans le délai d'une heure, et à 200° C., après seulement 5 minutes. En chauffant davantage, jusqu'à 400° C., il n'y a pas de vieillissement. Cela montre bien nettement que le soudage n'est pas un facteur sérieux dans la production de la fragilité par écrouissage et vieillissement, parce que cette fragilité se produira même aux températures ordinaires si la tôle est d'abord soumise au travail à froid. Mais l'étude montre bien que la chaleur du soudage peut bien accélérer le vieillissement et ainsi aggraver la fragilité à un moment donné.

L'auteur a fait également des essais pour déterminer, si possible, les moyens d'éviter la fragilité de vieillissement ; il a trouvé qu'en chauffant les échantillons pendant 6 heures à des températures jusqu'à 400° C. on n'a pas évité la fragilité ; 3 heures à 475° C. ont élevé la résilience Izod de 8 à 16 ft. lbs (1,1 à 2,2 kgm.), mais un temps plus long à cette température n'avait aucun effet. En plus j'ai trouvé qu'une heure à 525° ou 5 minutes à 550° ou 575° élevaient la résilience à 20 ft. lbs ; et une heure à 550 ou 5 minutes à 600° C. avaient rétabli la valeur Izod à 40 ft. lbs. Dans tous ces cas où la valeur Izod était inférieure à 30 ft. lbs. l'éprouvette était nettement cassée dans la machine Izod, tandis que dans tous les cas où la valeur Izod dépassait 30 ft. lbs. les échantillons étaient à moitié cassés et à moitié pliés. Cela montre définitivement qu'un trai-

tement à 550° C. pendant une heure ou à 660° C. pendant 5 minutes évitera complètement la fragilité. D'autres expériences ont démontré que la vitesse de refroidissement à partir de ces températures ne joue aucun rôle. Enfin, des échantillons normalisés après le traitement dit « tension-vieillessement » ou « vieillissement après écrouissage » étaient ramenés à la résilience normale, comme on pouvait bien le supposer d'avance.

Après cela, l'auteur a étudié les causes pouvant agir sur la susceptibilité au phénomène « tension-vieillessement » en conformité avec l'hypothèse que l'oxygène intervenant dans les méthodes de fusion et de coulée des aciers, était un facteur important; j'ai fait les essais sur des échantillons de fer puddlé, sur du fer dit « Armco » (acier à 0,03 % de carbone), sur le calmé au silicium et fabriqué au laboratoire, — sur de l'acier à 0,24 % de carbone, demi-calmé par l'aluminium et, enfin, de l'acier commercial à 0,33 % de carbone et 0,2 % de silicium.

J'ai trouvé que le fer « puddlé » ainsi que l'acier calmé au silicium produit au laboratoire n'avaient point de tendance au phénomène de tension-vieillessement. La résilience de l'acier commercial à une teneur de silicium de 0,2 % était abaissée de 30 à 22 ft. lbs. Izod, chose importante, mais pas grave. La résilience du fer « Armco » diminuait de 50 à 8 ft. lbs. et les autres aciers montraient des aciers analogues. A propos de cela il faut remarquer que le phénomène ne se voit pas au microscope parce qu'il n'y a pas de grands changements de texture. En outre, l'abaissement de résilience des échantillons allongés, mais non vieillis, est bien faible. Enfin, l'état de l'acier avant l'allongement et le vieillissement, c'est-à-dire laminé à chaud recuit, ou normalisé, ne joue aucun rôle.

Conclusions II.

1. — Les températures jusqu'à 600° C. n'affectent pas les propriétés des tôles ordinaires soudées à basse teneur en carbone.

2. — Les tôles commerciales à souder sont susceptibles au

phénomène de vieillissement après traction. On peut l'éliminer soit par un recuit à 600° C. pendant une demi-heure, soit en se servant de tôles en acier bien calmé avant la coulée. La fragilité de tension-vieillessement n'est pas produite par la chaleur du soudage, mais, si elle existe, l'effet peut être aggravé par le soudage.

L'EFFET DU GRADIENT DE TEMPERATURE

En général un chauffage inégalement appliqué à l'acier, produit des tensions internes à cause du gradient de température. Il est presque impossible d'éviter cet effet en soudant, mais on peut le réduire au minimum en suivant les meilleurs principes, en faisant la soudure. En général, à cause de la grande ductilité de l'acier employé pour le soudage, l'effet n'est pas grave. Si le chauffage local est très élevé, ou si les pièces soudées sont fortement serrées, la situation pourrait devenir grave. L'auteur n'a pas étudié cette question dans ce travail, mais une longue pratique, jointe à l'observation a montré que le recuit à 600° C. élimine au point de vue pratique ces tensions. Dans les applications importantes comme dans les chaudières on doit faire ce recuit après chaque soudage, quel qu'ait été le procédé employé : oxyacétylénique, électrique ou aluminothermique.

2^e THÈSE

Propositions données par la Faculté :

**ÉTUDE DES MÉTHODES DE NITRURATION
DES ACIERS SPÉCIAUX**

VU ET APPROUVÉ :

Nancy, le 19 juin 1933.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

L. LEAU.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Nancy, le 20 juin 1933.

*Le Recteur de l'Académie,
Président du Conseil de l'Université,*

L. BRUNTZ.

Bibliographie Chronologique

- 1857 JOULE (J.-P.). — On the Fusion of Metals by Voltaic Electricity. *Manchester Literary and Philosophical Soc. Mem.*
- 1883 LEDEBUR. — Contribution to the Metallurgy of Iron. *Glaser's Annalen für Gewerbe.*
- KEIL (Maurice). — Methods of Welding Cast Steels. (English). *Publication industrielle des machines par Armengaud.*
- BOEHM. — Weldability of Iron. *Chem. Ztg.*
- SIBUT. — Process for Combining Iron with Steel. *Stahl und Eisen.*
- HILBIG. — Weldability of Iron. *Rigaschs Industrie Ztg.*
- 1885 BAUSCHINGER. — Comparative tests of weldability of wrought and weld iron (Fluss und Schweiss-Eisen). *Der Maschinenbauer.*
- 1887 RIEHLMANN (R.). — The Bernardo's électric soldering and welding process. *Ver. deutsch Ing.*
- 1888 DOLBEAR (A.-E.). — Tests on Electric Welding. *Eng et Building Record* (N.Y.).
- 1889 RICHARD (G.). — Electric Welding. *Lumiere Electrique.*
- FISCH (W.-C.). — Thomson electric welding process. *Iron St. Inst. Jl.*
- 1890 BROMWELL (F.). — Application of electricity to welding, stamping and other cognate purposes. *Inst. Civ. Engrs. Proc.*
- 1891 RICHARD (G.). — Soudage Electrique. *Lumiere Elect.*
- PERRINE (F.-A.-C.). — Practical aspects of Electric Welding. *Amer. Inst. Elec. Engrs.*
- 1892 BURR (S.-D.-V.). — Electric Metal Working. *Iron Age.*
- OURSEL. — Essais comparativ de soudabilité de l'acier coulé. *Rev. Chemin de fer.*

- 1894 RICHTER (Carl). — On the Benardos Electric Welding Process. *Electrotech. Zeitz.*
— DOBSON (B.-A.). — Electric Welding. *Inst. Mech. Engrs, Proc.*
- 1895 RICHARD (G.). — Soudage Electrique. *Eclairage Electr.*
— FOSTER (Henry). — On the Application of the electric arc to machinery and boiler repairs. *Marine Eng. London.*
- 1896 MAC CARTHY, SAM'L. — Steel steam pipes and fittings and Benardos arc welding in connection therewith. *Inst. Civil Engrs.* (London). *Min. and Proc.*
- 1897 MOXHAM (A.-J.). — History of Electric Welding. *Iron Age.*
- 1898 WALLIS (Jones). — Welding of train-rails. *Inst. Elec. Engrs. Proc.*
- 1905 BUREAU VERITAS. — Soudage Autogène. *Revue Technique.*
— FITTS (J.-L. et Al.). — Electrically Welded Screw-Caps and Bolts. *Francklin Inst. Jl.*
- 1906 SCHUEN (W.). — Electric Welding. *Elektr. Rundschau.*
— KIRSCH (B.). — Comparative tests of electric and thermite welds. *Elektrotech and Maschinenbau.*
- 1909 RINNE (H.). — Autogenous Welding. *Stahl und Eisen.*
- 1910 FREMONT (C.). — Observations sur la résistance des soudures. *Genie Civil.*
— SMITH (H.-S.). — Oxyacetylene Welding. *Royal Society of Art Journal.*
— YOUNGER, SCOTT (A.). — Steamship repairs by electric and autogenous welding. *Inst. Engrs et Shipldrs, Scotland.*
— VON BACH (E.). — Tests of autogenous welds of boiler plate. *Ver. deutsch Ing. Mitt. ueber Forschungsarbeiten auf. d. Gib. d. Ing.*
- 1911 LAW (Edw.-F.), MERRETT, (W.-H.), DIGBY (W.-P.). — Studies of Welds. *Iron Steel Inst. Jl.*
- 1914 BARRACLOUGH (S.-H.). — Deformation of welded drums : tests of welds made by the oxyacetylene process. *Power Mag.*
— CAMPION (A.), GRAY (W.-C.). — Strength of welds by the oxyacetylene process; abstracts. *Engineer.*
- 1916 HOHN (E.). — Tests of autogenous welds of boiler plate. *Locomotive.*
— SIBLEY (F.-H.). — Tests of welded pipe connections. *Iron Tr. R.*

- 1917 MOORE (H.-F.). — Tests of oxyacetylene welded joints in steel plates. *Ill. V. Eng. Exp. Sta. Bul.*
- NORTON (E.-S.). — Assisting shrinkage in autogenous welding by mechanical means. *Ry. Mech. Eng.*
- HOHN (E.). — Tests of autogenous welds of boiler plate. *Locomotive.*
- ARMSTRONG (P.-A.-E.). — Welds, the weakness and Merits of their Structure. *Power.*
- 1918 MILLER (S.-W.). — Structures in steel fusion welds. *Am. Inst. Min. E. Bul.*
- KLAGES (E.-A.). — Strength of weld in wrought iron pipe. *Gas Age.*
- 1919 MILLER (S.-W.). — Path. of Rupture in steel fusion welds. *Am. Inst. Min. E. Bul.*
- 1920 MILLER (S.-W.). — Study of the testing of welds. *Blast F. and Steel Pl.*
- Comparative welding tensile tests. *Blast F. et Steel Pl.*
- 1921 FREMONT (Chas.). — Fragilité observé à « chaleur bleu » dans soudures. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences.*
- FESSENDEN (E.-A.). — Some tests on welded ammonia containers. *A. S. R. E. J.*
- FARMER (F.-M.). — Desirability of standardisation in the testing of welds. *Engineering.*
- FARMER (F.-M.). — Standardisation in the testing of welds. *Engineer.*
- 1922 ESCHOLZ (O.-H.). — Non-destructive methods of examining welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- MAC CUNE (C.-A.). — Manufacture and use of commercially pure iron in gas and electric welding. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- NAMOCK (W.-H.). — Electric Arc welding of cast iron. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- 1922 NEAD (J.-H.), KENYON (R.-L.). — Applications and tests of large diameter electric welded pipe. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- SPELLER (F.-N.). — Fusion welding as applied to wrought pipe joints. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- NEAD (J.-H.), KENYON (R.-L.). — Fusion tests to determine the suitability of various metals for welding purposes. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- FESSENDEN (E.-A.), BRADFORD (T.-J.). — Tests on welded cylinders. *Mech. Eng.*
- ROARK (R.-J.). — Strength of mechanically welded pressure containers. *Mech. Eng.*

- 1922 SPOONER (T.), KINNARD (I.-F.). — Electrical and magnetic weld testing. *Iron Age*.
 - DIEGEL (C.). — Elektrische und schmelzflammen schweissung unter berucksichtigung von schweissdiahten mit umhülung. *Stahl und Eisen*.
 - SPOONER (T.), KINNARD (I.-F.). — Electrical and magnetic weld-testing as applied to butt-welded steel plates. *Amer. Soc. Test. Mat., Proc.*
- 1923 KAUTNY (T.). — Depreciation tests of wrought iron sheet in autogenous welding plants. *Autog. Metallbearb.*
 - WILSON (W.-L.). — Tests of welded rail joints. *Elec. Ry. J.*
 - WILSON (W.-L.). — Investigation of welded pressure vessels. *Mech. Eng.*
 - WILSON (W.-L.). — Rail Joint tests on the Detroit municipal railway. *Elec. Ry. J.*
 - STANG (A.-H.), GREENE (T.-W.). — Stresses in a few welded and riveted tanks tested under hydrotatic pressure. *U. S. Bur. Stand. Tech. Pa.*
 - MELS (Otto). — On the évolution of experimental results of weld tests. *Schmelgscweissung*.
- 1924 MENETRIER (A.). — A. cheap, reliable, and exhaustive method of testing welded joints. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - PEARCE (J.-C.). — The welding of cast iron from a metallurgical point of view. *Acetylene Jl.*
- 1925 DAVIS (A.). — Test on pressure vessel welding. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MILLER (S.-W.). — The rationale of safe welded, unfired pressure vessels. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MILLER (S.-W.). — Testing the finished weld. *Am. Welding Soc. Jl.*
 - SPRARAGEN (W.). — Standardization in welding. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - CARTER (H.-M.). — Control of manufacture and acceptance tests of welding rods. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MAC CUNE (C.-A.). — Welding wire a factor in good welding. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - LUDINGTON (W.-H.). — Testing welds in railroad shop welding. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - HOHN (E.). — On the form and testing of welded samples. *Zeit Ver Deutsch. Ing.*
 - MOORE (R.-R.). — Fatigue of welds. *Mech. Eng.*
 - BOCK (E.). — Testing welded joints. *Maschinenbau*.
 - HOHN (E.). — Shape and testing of autogenous and electrically welded test bars. *Zeit des Ver. Deutscher Ing.*

- 1926 HOHN (E.). — Autogenously and electrically welded boilers and containers. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- OWENS (J.). — Design of welded joints in ship construction. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- EAGAN (H.-P.). — Structural steel welding on a commercial basis. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- WILLIAMS (F.-H.). — The organization of welding on the railroads. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- STORM (R.-A.). — Fabricating structural steel with the « electric arc process ». *Am. Weld. Soc. Jl.*
- CANDY (A.-M.). — Structural steel joints fundamentally designed for arc welded connections. *Am. Weld. Soc. Jl.* of structural steel. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- BISSELL (A.-G.). — Electric arc welding in the manufacture
- SPRARAGEN (W.). — Testing of a new rail joint. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- MOSS (H.-H.). — Tests on oxyacetylene welded roof trusses. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- SWAIN (P.-W.). — X-ray tests of welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- WOODWORTH (H.-A.). — Welds made stronger than the welded material. *Power Pl. Eng.*
- ROLLER (L.-H.). — Tests on welded pressure vessels. *Refrig. Eng.*
- MOORE (R.-R.). — Strength of welded tubes; abstract. *Soc. Auto. Eng. J.*
- MOORE (R.-R.). — Effect of hydraulic shock tests on welded drum. *Power.*
- MEADOWCROFT, (J.-W.). — Comparative strength of spot welds and rivets. *Am. Mach.*
- HOHN (E.). — Welded Pressure Vessels. *Zeit. Ver Deutsch. Ing.*
- Watertown Arsenal, and Union Carbide et Carbon Research Labs. — X-Ray tests of welds reveal some defects but not. all. *Power.*
- DUSTIN (H.). — Etudes de la soudure autogène et électrique. *Revue Univ. Mines.*
- SCHOTTSKY (P.-H.). — Fusion welding and permanent fracture. *Kruppsche Monatshefte.*
- SCHIMPKE (P.). — Oxyacetylene and electric welding of cast iron. *Stahl und Eisen.*
- 1927 ROUX (L.). — Essais des soudures au moyen des lignes magnétiques. *Acad. des Sciences. Comptes Rendus.*
- MILLER (W.-B.). — The bend test as applied to welded coupons. *Am. Weld. Soc. Jl.*

- 1927 American Bureau of Welding. — Survey of existing test data.
Am. Weld. Soc. Jl.
- WHITTEMORE (H.-L.). — Test of an arc welded plate by the American Bridge Co. and the U. S. Bureau of Standards. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - JONES (L.-T.), WEEKS (W.-S.). — The welding of the Mokelumne pipe line. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - Am. Bureau of Welding Report. — Elevated temperature tests of welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MOORE (R.-R.). — Fatigue of welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - GROVE (H.-E.). — Test results of welding of steel structures. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MILLER (S.-W.). — Examination of the ruptured head of the ethylene tank. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - Committee on welded rail joints. — Test results on welded rail joints. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - NORTON (T.-J.). — Welded joints searched by X-rays. *Mech. Eng.*
 - TAFEL (W.), HEIL (W.). — Ueber schweissbarkeit. *Stahl und Eisen.*
 - BIRD (H.-B.). — Tests in connection with gas and metal arc welding as applied to aircraft construction; abstract. *Mech. Eng.*
 - SPRARAGEN (W.). — Testing the safety of welded structures. *Factory.*
 - HOHN (E.). — Electrically welded reinforcing straps on boilers and containers.
 - HOHN (E.). — Tests of welds at Lehigh University. *Eng. News, Rec.*
- 1928 MILLER (W.-B.). — Easy method for testing welds for ductility. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- ROARK (R.-J.). — Static and impact tests of electrically welded joints. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - SHIMKIN (B.-M.). — An interesting thesis on structural arc welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - American Welding Society. — Some structural aspects of welds in specimens of firebox steel tested at normal and elevated temperatures. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - MAC KIBBEN (F.-P.). — Tests of arc welded steel frames for structural work. *Am. Weld. Soc. Jl.*
 - REED (O.). — Weld efficiency in penstock pipe using overlap welds. *Eng. N.*
 - GOELZER (A.). — La résistance élastique des joints soudés. *Génie Civil.*

- 1928 HERR (A.J.). — X-ray tests of welds. *Zeit Ver. Deutsch Ing.*
— LLEWELLYN (F.-T.). — Present status of structural steel welding. *Amer. Iron Steel Quot. Year-Book.*
— ZIMM (W.). — Practical testing of welds by metallographical means and with X-rays. *Waerme.*
— GOODGER (A.-H.). — The metallurgical aspect of welding. *Manchester Assn. Engrs. Trans.*
- 1929 KINZEL (A.-B.), BURGESS (C.-O.), LYTLE (A.-R.). — Non-destructive testing of welds by means of the stethoscope and X-ray. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— LOBO (G.). — Strength of butt welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— GILLESPIE (P.), HUGHES (C.-A.), JACKSON (K.-B.), FOX (J.-H.). — Report on pilot. tests. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— MEADOWCROFT (J.-W.). — Testing resistance welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— TATNALL (F.-C.). — How to test welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— BOYLSTON (H.-M.), JENKIN (A.), CARPENTER (J.-C.). — A metallographic study of some metallic arc welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— KREFELD (W.-J.). — Transverse bending tests on welded I beams. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— LINCOLN (J.-C.). — Ductility and Tensile strength of welds for pressure vessels. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— ROSENTHAL (D.). — Détermination de la résistance des soudures. *Acad. Sc. Compt. Rend.*
— GILLESPIE (P.). — Structural Welding Experimental Study. *Can. Engr. (Toronto).*
— GILLESPIE (P.). — Welding Soc. discusses non-destructive tests. *Chem. et Met. Eng.*
— GILLESPIE (P.). — Weld test of heavy colum joints shows good results. *Eng. N.*
— GILLESPIE (P.). — Structural welding experimental study. *Can. Eng.*
— DUSTIN (H.). — Le calcul des joints soudés en charpente métallique. *Génie Civil.*
— SPERRY (E.). — Automatic non-destructive weld tester examines 20,00 rails a day ; Sperry rail tester ; abstracts. *Power.*
- 1930 EXLEY (G.-R.). — Classification and physical tests for various types of welded plate joints. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— SCHUSTER (L.-W.). — Strength and design of fusion welds for unfired pressure vessels. *Am. Weld. Soc. Jl.*
— BURKHART (L.-H.). — Welding of super code pressure vessels. *Am. Weld. Soc. Jl.*

- 1930 BIBBER (L.-C.). — Theory of stresses in welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- ENDICOTT (De W.). — Testing sheet steel for weldability. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- MEHL (R.-F.), DOAN (G.), BARRETT (C.S.). — Note on the use of Gamma rays for examining welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- JENNINGS (C.-H.). — Fatigue and Impact tests for welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- Thornton (G.-E.). — Study of welded metals under fatigue tests. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- VOGEL (Andrew). — Shear tests for welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- MILLER (W.-B.), OWENS (J.-W.). — Symposium on standard tests for welds — proposed standards; bend tests; tensile tests. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- EDWARDS (J.-H.), WHITTEMORE (H.-L.), STANG (A.-H.). — Transverse tests of H-section column splices. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- JENNINGS (C.-H.), JAKKULA (A.-A.). — Strength investigations on welded beam connections. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- ROSENTHAL (D.), MATHIEU (M.). — Sur les soudures en acier doux à l'arc électrique. *Acad. Sc. Compt. Rend.*
- EXLEY (G.-R.). — Classification and physical tests for various types of welded plate joints. *Gen. Elec. R.*
- EDWARDS (J.H.), WHITTEMORE (H.-L.), STANG (A.-H.). — Compressive tests of bases for subway columns. *U. S. Bur. Stand. J. Research.*
- HOFFMAN (W.). — Fatigue strength of welds. *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.*
- FUCHSEL. — Fatigue strength and testing of welds. *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.*
- ROSENTHAL (D.). — Le calcul des joints soudés en charpente métallique, cas d'un assemblage mixte. *Génie Civil.*
- HENDRICKSON (J.-B.). — Inspection of welded construction. *Welding Engr.*
- FUECHSEL (M.). — Applicability of the bending test for testing welds. *Elektroschweissung.*
- MOYNAHAN (G.-B.). — Testing Welds. *Engineer.*
- WHITTEMORE (H.-L.), BRUGGEMAN (W.-C.). — Strength of welded joints in tubular members for aircraft. *U. S. Nat. Advisory Com. for Aeronautics.*
- SCHUSTER (L.-W.). — Strength and design of fusion welds for unfired pressure vessels. *Inst. Mech. Eng. Proc.*

- 1930 TATNALL. — Southwark portable machine for testing welds. *Iron Age*.
- TATNALL. — Proposed specifications for fusion welding of drums or shells of power boilers. *Mech. Eng.*
- WATTS (T.-R.). — Magnetic Testing of butt welds. *Power*.
- BERNHARD (R.). — Endurance tests on riveted and welded bridges. *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.*
- KINZEL (A.-B.), DAWSON (J.-R.). — Destructive and non-destructive tests of welds. *International Acetylene Assn.*
- EXLEY (G.-R.). — Classification and physical tests for various types of welded plate joints. *Gen. Elec. Rev.*
- HOFFMAN (W.). — Fatigue strength of welded steel joints. *V. D. I. Zeit.*
- THORNTON (G.-E.). — A study of welded metals under fatigue tests. *St College Wash. — Mo Bul.*
- HOEHN (E.). — Securing welded joints with butt straps.
- TULACZ (P.). — Modern methods for testing welded joints. *Zeit des Oberschlesischen Berg. u. Huettenmaennischen Vereins zer Katowice.*
- 1931 Oxweld Acetylene Co. — Portable machine tests strength of welds. *Steel*.
- JENNINGS (C.-H.). — Dynamic properties of arc welded joints. *Iron and St. Engrs.*
- JOHNSON (J.-B.). — °R
- JOHNSON (J.-B.). — Fatigue properties of welds. *Welding*.
- WEINMAN (R.-A.). — Fatigue properties of welds. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- PETERSOSN (R.-E.), JENNINGS (C.-H.). — Fatigue tests of weld metal. *Am. Soc. St. Tr.*
- DOAN (G.-E.). — Inspection of welds with Gamma rays. *Am. Soc. St. Tr.*
- JENNINGS (C.-H.). — Relief of welding strains by annealing. *Am. Weld. Soc. Jl.*
- PORTEVIN (A.). — Soudure Autogène et Métallographie. *Rev. de la Soudure Autogène.*
- FREEMAN (F.-R.). — Strength of arc-welded joints. *Inst. Civil Eng'rs.*
- PRIEST (H.-M.). — Strength of structural welds. *Eng. News. Rec.*
- HOFFMAN (W.). — Fatigue characteristics of oxyacetylene welded steel joints. *Autogene Metallebearbeitung.*
- MIES (O.). — Bending tests with welds. *Elektroschweissung.*
- BAUMGARTEL. — Fatigue testing of acetylene welds. *Autogene Metallebearbeitung.*

- 1931 NORTON (J.-T.). — Examinations of welds by X-ray diffraction method. *Prac. des Ind. Mecaniques.*
- WEINMAN (R.-A.). — Fatigue properties of welds. *Amer. Weld. Soc. Jl.*
- BARTELS (W.-B.). — Fatigue tests of cast iron welds. *Ver. deutsch. Ing. Zeits.*
- JENNINGS (Chas.-H.). — Relief of Welding strains by annealing. *Amer Weld. Soc. Jl.*
- MOSS (H.-H.). — Some tests of gas welded structural joints. *Amer. Weld. Soc. Jl.*
- JENNINGS (C.-H.). — Effect of welding procedure on shrinkage strains in butt-welded joints. *Amer. Weld. Soc. Jl.*
- WILSON (W.-M.), MATHER (J.), HARRIS (C.-O.). — Tests of joints in wide plates. *Ill. V. Eng. Sta. Bull.*
- COKER (E.-G.), LEVI (R.). — Stress distribution in fusion joints. *Inst. Mech. Eng. Proc.*
- WATTS (T.-R.). — Ways of proving a good weld. *Elec. W.*
- WATTS (T.-R.). — Torsional fatigue of welded steel. *Engineer.*
- WATTS (T.-R.). — Testing butt welds by magnetic methods. *Elec. J.*
- PRIEST (H.-M.). — Strength of structural welds; five year research program of Am. Bur. of welding, digest of report on structural steel welding committee. *Eng. N.*
- DAWSON (J.-R.). — Stethoscopic examination of welded products. *Power Pl. Eng.*
- WATTS (T.-R.). — Non-destructive tests of welds; abstract. *Mech. Eng.*
- DE FORREST (A.-V.). — Non-destructive tests by the magnetic dust method. *Iron Age.*
- SIMONDS (H.-R.). — Magnetic testing of pipe welds is new inspection method. *Steel.*
- 1932 STEPHEN (R.-A.). — X-rays in the welding industry. *Engineer.*
- British engine, boiler and electrical insurance Co Ltd. — Technical Report for 1930-31. *Elec. R. (London).*
- WATTS (T.-R.). — Magnetic methods of testing butt welds. *A. S. T. M.*
- JASPER (T.-M.). — Fatigue and impact testing of welded products. *A. S. T. M.*
- SPRARGEN (W.). — Designing and testing welds in high pressure vessels. *Iron Age.*
- SPRARGEN (W.). — Detecting faulty welds. *Electrician.*

- 1932 British engine, boiler and electrical insurance Co. Ltd. — Experimental work on welds. *Engineer*.
- British engine, boiler and electrical insurance Co. Ltd. — Tests for Welding. *Aviation Eng.*
- SLATER (W.-A.), FULLER (M.-O.). — Tests of riveted and welded steel columns. *Am. Soc. C. E. Proc.*
- ROSENTHAL (D.). — Augmentation de la résistance aux chocs répétés de pièces assemblées par soudure. *Génie Civil*.
- WEESE (E.). — Autogenous welding of copper fire-boxes. *Engineer*.
- ZIELER (W.). — Carburizing test for quality of welded joints. *Il. Metal Prog.*
- British engine, boiler and electrical insurance Co. Ltd. — Experimental work on welds. *Engineer*.
- HALSEY (W.-D.). — Hartford Steam Boiler and Fusion Welding. *Locomotive*.
- BATCHELLER (J.-R.). — Bridge Method of Testing Welds. *Elec. Eng.*
-

TABLE DES MATIÈRES

Etude des méthodes d'essai des soudures oxyacétyléniques des tôles d'acier et étude des effets de la chaleur du soudage dans les régions de la tôle voisines de la soudure.....	7
Les essais destructifs	9
L'essai de flexion quantitatif.....	21
L'essai de dureté	31
Essai de fatigue	34
L'essai de résilience.....	37
Les essais non destructifs.....	41
Les essais aux Rayons X.....	44
L'essai aux Rayons Gamma.....	46
L'essai de résistance électrique	48
Les essais magnétiques	49
Effet de la chaleur de soudage produite dans les tôles d'acier sur les propriétés mécaniques des tôles.....	51
Effets des températures jusqu'à 600° C.	72
L'effet du gradient de température.....	77
Bibliographie chronologique	79
